ÜBER DIE FARBENWIEDERGABE MIT DER LIPPMANNSCHEN METHODE

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

BEI DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

UNIVERSITÄT LEIPZIG

EINGEREICHT VON

REINHOLD ARON
AUS BERLIN

MIT ZWEI TAFELN

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

LEIPZIG
JOHANN AMBROSIUS BARTH
1914

Angenommen von der III. Sektion auf Grund der Gutachten der Herren Wiener und Des Coudres.

Leipzig, den 28. April 1914.

Kirchner,
Prokanzelar.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig

DEM ANDENKEN MEINES VATERS.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545822_0015

Die vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Universität Leipzig ausgeführt. Meinem hochverehrten Lehrer

Herrn Geheimrat Professor Dr. O. Wiener

spreche ich hiermit meinen aufrichtigsten Dank aus für das stete Interesse, das er der Arbeit entgegenbrachte, und die Unterstützung, die er ihr durch seinen stets bereitwillig erteilten Rat und die liebenswürdige Überlassung aller erforderlichen Hilfsmittel angedeihen ließ.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 9

Messungsmethode zur Bestimmung der Intensität und Wellenlänge des Bildes . 13

1. Spektralbild der Aufnahme einer homogenen Farbe 17

2. Wellenlänge des Bildes einer homogenen Farbe 29

3. Intensität des Bildes einer homogenen Farbe 33

4. Aufnahme von zusammengesetztem Licht 35

Herstellung der Schichten 44

Zusammenstellung der Ergebnisse 47

Einleitung.

Von den Arbeiten über die Lippmannphotographie ist die Arbeit von Wiener[1]) die erste, die sich mit Fehlerquellen bei der Farbenwiedergabe beschäftigt. In dieser Arbeit weist Wiener den schädlichen Einfluß der Oberflächenreflexion der photographischen Schicht auf die Farbenwiedergabe nach und gibt gleichzeitig Mittel zur Beseitigung dieser Fehlerquelle an die Hand. Von den später erschienenen Arbeiten sind die Arbeiten von Lehmann[2]) und Ives[3]) zu nennen. Lehmann wandte bei seinen Untersuchungen verhältnismäßig dünne empfindliche Schichten an, wie sie bis dahin in der Lippmannphotographie allgemein üblich waren und als allein verwendbar angesehen wurden. Je dünner aber die empfindliche Schicht ist, umsomehr entfernt man sich von der Erfüllung einer Grundbedingung der Theorie einer exakten Farbenphotographie mit stehenden Lichtwellen, nämlich der Beteiligung unendlich vieler Elementarspiegel. Deshalb haben Beobachtungen, die ausschließlich an Aufnahmen auf solchen Schichten gemacht wurden, auch zunächst nur für diese Gültigkeit. (Immerhin konnte Lehmann auch an diesen Aufnahmen noch die Auflösung einer Kombination von zwei und drei homogenen Farben feststellen.)

In dieser Richtung bedeutet die Arbeit von Ives einen Fortschritt. Ives zeigte, daß in Übereinstimmung mit der Theorie dicke empfindliche Schichten — er benutzte bis zu 0,1 mm dicke — mit Vorteil angewandt werden, wenn sie in geeigneter Weise entwickelt werden. Bei dem bis dahin üblichen, sehr energisch wirkenden Pyrogallol-Ammoniakentwickler war der Entwicklungsprozeß an der Oberfläche schon vollendet, bevor die tiefer liegenden Bromsilberpartikel überhaupt mit dem Entwickler in Berührung kamen. Es war also bei dickeren Schichten unmöglich, mit diesem Entwickler eine gleichmäßige Entwicklung in der ganzen Tiefe der Schicht zu erzielen.

Ives benutzte nun langsamer wirkende Entwickler wie Hydrochinon, Glyzin und Eisenoxalat und erzeugte mit diesen Lippmannphotographien monochromatischer Lichtquellen auf dicken Schichten, deren Querschnitte im Mikroskop bis zu 250 Elementarspiegel aufwiesen. Um die Absorption der Elementarspiegel auszuschalten, machte er sie durch Baden in 2%iger Sublimatlösung durchsichtig. Die wichtigsten Tatsachen, die von ihm an so hergestellten Aufnahmen beobachtet wurden, sind die Wiedergabe der grünen Quecksilberlinie ($\lambda = 546{,}1\ \mu\mu$) als Bande von 2 $\mu\mu$ Breite und die Auflösung einer Kombination von vier homogenen Strahlenarten. Wie schon Lehmann vor ihm, konstatierte er einen Helligkeitsverlust der Bilder der Komponenten bei der Aufnahme einer zusammengesetzten Farbe im Vergleich zur Helligkeit der Bilder, die die einzeln aufgenommenen Komponenten lieferten.

Auf eine genauere quantitative Untersuchung gehen die Arbeiten von Lehmann und Ives nicht ein. Vor allem diese Lücke sucht die vorliegende Untersuchung auszufüllen, die sich zum Teil an die erwähnten Arbeiten anschließt.

Es wurden im besonderen folgende Fragen untersucht:

1. Wie sieht das Spektralbild der Aufnahme einer homogenen Farbe aus?

2. Wird die Wellenlänge der wiedergegebenen Farbe von Entwicklung, Exposition und anderen in Betracht kommenden Faktoren beeinflußt und wie groß ist die durchschnittliche Abweichung der Wellenlänge der wiedergegebenen von der der aufgenommenen Farbe?

3. Wie ändert sich die Intensität des Bildes mit Belichtungs- und Entwicklungsdauer und welcher Bruchteil des einfallenden Lichts wird durchschnittlich im Maximum des Spektrums der Aufnahme einer homogenen Farbe reflektiert?

4. Wie ändert sich die gegenseitige Beeinflussung der Bilder der Komponenten einer zusammengesetzten Farbe mit der Stärke der Belichtung der einzelnen Komponenten?

Das Verfahren, nach dem die Schichten hergestellt wurden, die bei den meisten im folgenden beschriebenen Versuche Verwendung fanden, ist in einem späteren Kapitel ausführlich beschrieben (s. S. 44). In den Fällen, wo anders hergestellte Schichten Verwendung fanden, ist dies ausdrücklich angegeben.

Die Schichtdicke der selbsthergestellten Schichten schwankte zwischen 0,02 und 0,07 mm. Im allgemeinen betrug sie 0,03 bis 0,04 mm. In Anbetracht der Kleinheit der Lichtwellenlänge be-

deutet die Verwendung von 0,04 mm dicken Schichten schon einen ziemlich hohen Grad der Annäherung an den Idealfall der theoretisch geforderten unendlich dicken Schicht.

Es wurden ausschließlich homogene Farben, entweder einzeln oder zwei bis sechs übereinander aufgenommen. Als Lichtquellen dienten der Quecksilberbogen, die Natriumflamme und spektral zerlegtes weißes Licht. Von den Quecksilberlinien wurden nur die gelbe Doppellinie und die grüne Linie ($\lambda = 579{,}0\ \mu\mu$, $576{,}9\ \mu\mu$ und $546{,}1\ \mu\mu$) benutzt, die durch eine Hochdruckquecksilberbogenlampe von Heräus in Hanau[1]) erzeugt wurden. Der Quecksilberbogen wurde bis auf einen Teil von 5 cm Länge abgeblendet und in den Brennpunkt einer Linse von 27 cm Brennweite gebracht. Das von dieser parallelisierte Licht traf die unmittelbar dahinter befindliche Schicht in ihrer ganzen Ausdehnung unter annähernd rechtem Winkel, so daß es von dem Quecksilberspiegel in sich selbst reflektiert wurde.

Ebenso war die Anordnung bei der Natriumflamme, die durch Einbringen von Soda auf einem Platinnetz in die Flamme zweier kombinierter Bunsenbrenner erzeugt wurde; nur wurde hier die Lichtquelle nicht abgeblendet, um die schon an sich geringe Lichtintensität nicht noch zu verkleinern.

Bei der Aufnahme der grünen Quecksilberlinie allein wurde zum Zwecke der Absorption der anderen Quecksilberlinien ein Kaliumchromat- und ein Didymnitratfilter, bei der gleichzeitigen Aufnahme der grünen und der gelben Quecksilberlinie ein Kaliumchromat- und ein sehr schwaches Didymnitratfilter eingeschaltet, letzteres zur Schwächung der etwas intensiveren gelben Doppellinie.

Wurde die letztere allein aufgenommen, so wurde sie durch spektrale Zerlegung isoliert, da alle Farbstoffe, die die grüne Linie absorbieren, auch die gelbe Linie merklich schwächen.

Bei der Aufnahme der Natriumlinie $\lambda = 589{,}3\ \mu\mu$ wurde zur Vermeidung schädlicher, kurzwelliger Strahlung ein Kaliumbichromatfilter eingeschaltet.

Die spektrale Zerlegung von weißem Licht wurde durch einen Steinheilschen Prismenspektrographen mit dreiteiligem Rutherfordprisma bewirkt, bei einer Breite des Spaltes von 0,03 mm. Auf diesen wurde das Licht einer mit ca. 30 Ampère brennenden Bogenlampe mittelst eines Kondensors konzentriert. Zur Schwächung des weniger stark dispergierten langwelligen Teils wurde eine schwache Viktoriablaulösung eingeschaltet.

Die Quecksilberkassette war in der Weise eingerichtet, daß alle Teile, die mit dem Quecksilber in Berührung kamen, mit Ausnahme der Löschpapierdichtung und der empfindlichen Schicht, aus Glas waren. Das wurde dadurch erreicht, daß anstatt der üblichen eisernen, an die Rückseite der Dichtung angepreßten Platte eine solche aus Glas und anstatt der an dieser befestigten Röhren aus Eisen zum Quecksilbereingießen bzw. zum Entweichen der Luft, Röhren aus Glas benutzt wurden. Diese wurden in Glasschliffe eingesetzt, die an zwei diametral gegenüberliegenden Ecken auf die Glasplatte aufgekittet waren. Die letztere war an diesen Stellen durchbohrt. Um ein Platzen der Glasplatte zu verhindern, wurde diese mehrere Millimeter stark genommen und darauf eine Eisenplatte gelegt, die den von den Schrauben beim Anpressen der Glasplatte an die Dichtung ausgeübten Druck ausglich.[5])

Auf diese Weise wird das Quecksilber längere Zeit vor Verunreinigung geschützt, was für die Vermeidung von Schlieren wichtig ist. Von Zeit zu Zeit wurde das Quecksilber durch Schütteln mit verdünnter Salpetersäure im Scheidetrichter und darauf folgende Destillation gereinigt.

Die nach dem Herausnehmen der Platte aus der Kassette an der Schicht haftenden Quecksilberteilchen wurden durch Abreiben der Schicht mit einem Wattebausch entfernt.

Entwickelt wurde mit einer 0,5 %igen Lösung von Pyrogallol in dest. Wasser bei ca. 16° C, die ähnlich wie die bekannten langsamen Entwickler wirkt. In dieser Lösung blieben die Platten im allgemeinen 2 Minuten, dann wurden sie 5 Minuten ausgewaschen und darauf im Trockenschrank (s. S. 46) getrocknet. Selbst bei den langsamer wirkenden Entwicklern macht sich noch ein Unterschied der Entwicklerwirkung an der Oberfläche und in der Tiefe bemerkbar. Die Folge davon ist, daß die Entwicklung mit dem Herausnehmen der Platten aus der Entwicklerlösung noch nicht beendet ist. In der Tiefe der Schicht geht der Entwicklungsprozeß im wesentlichen erst beim Waschen der Platten vor sich, da der Entwickler nur langsam in die Schicht eindringt und zunächst nur oberflächlich ausgewaschen wird. Der Umstand, daß auch das Auswaschen des Entwicklers zunächst nur oberflächlich erfolgt, gleicht die Benachteiligung der tieferliegenden Elementarspiegel bei der Entwicklung ein wenig aus.[6])

Auch der von Neuhauss[7]) empfohlene Pyrogallol-Ammoniumkarbonatentwickler lieferte homogene Farben, aber der Zusatz von Ammoniumkarbonat erwies sich bei den benutzten Schichten als

vollkommen entbehrlich. Auch reine Lösungen von Brenzkatechin, Hydrochinon, Glycin und Eisensulfat lieferten Bilder, die aber bei weitem nicht so gut waren, wie die mit reiner Pyrogallollösung erhaltenen. Die Lehmannschen Platten wurden nach der von Lehmann gegebenen Vorschrift entwickelt.

Fixiert wurde im allgemeinen nicht, da das Fixieren mit allen bekannten Fixiermitteln eine starke Verschiebung der Farben in der Richtung kürzerer Wellenlängen zur Folge hat. Übrigens sind, wie schon von anderen Experimentatoren festgestellt, die einmal entwickelten Schichten ausreichend unempfindlich, um in mäßig intensivem Licht beobachtet werden zu können.

In den Fällen, wo die Schichten ausgeblichen, d. h. die Elementarspiegel für alle Farben durchsichtig gemacht wurden, wurde dies nach dem Vorgange von Ives durch Baden in 2 %iger $HgCl_2$-Lösung erreicht. Fixiert man vor dem Ausbleichen, so erhält man inhomogene Bilder.

Die von Ives benutzten Entwickler lieferten so dunkle Niederschläge, daß er die Elementarspiegel stets mit $HgCl_2$ ausbleichen mußte. Bei Verwendung reiner Pyrogallollösung als Entwickler ist für grünes und rotes Licht die Durchlässigkeit groß genug, um das Ausbleichen überflüssig zu machen. Bei der Aufnahme von Blau und Violett ist es allerdings unerläßlich, da die Absorption des braunen Silbers in diesem Gebiete sehr bedeutend ist. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde aber fast ausschließlich mit der Natriumlinie, der gelben und grünen Quecksilberlinie gearbeitet. Hier ist die Absorption gerade groß genug, um bei der Betrachtung von der Glasseite die an der Oberfläche befindlichen, stets kräftig, aber niemals sauber ausgebildeten Elementarspiegel nicht zu stark zur Geltung kommen zu lassen. So kommt es, daß Aufnahmen dieser Farben durch das Ausbleichen meist inhomogener wurden. Der oft nur geringe Zuwachs an Intensität wiegt diesen Nachteil nicht auf.

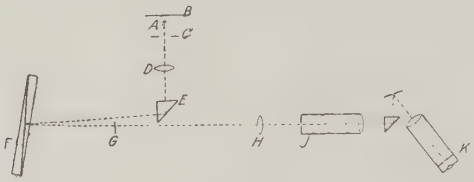
Aus diesem Grunde wurde das Hilfsmittel des Ausbleichens nur selten angewandt.

Die Oberflächenreflexion der Aufnahmen wurde bei allen Beobachtungen durch Verwendung einer Benzolküvette ausgeschaltet.[8])

Messungsmethode zur Bestimmung der Intensität und Wellenlänge des Bildes.

Die zur Messung benutzte Versuchsanordnung ist aus der Figur 1 ersichtlich.

A ist ein Nernststift, D eine Linse von 18 cm Brennweite, die das Bild des Nernstkörpers nach Reflexion der Strahlen an dem total reflektierenden Prisma E und der in einer Benzolküvette befindlichen Aufnahme F in der Ebene des Spiegels G entwirft Dieser und das Bild des Nernstkörpers werden durch die Linse H scharf auf den Doppelspalt J eines Gitterspektroskops übereinander abgebildet, so daß die Grenze des Bildes von G[9]) auf die Grenze der beiden Spalte fällt.



Figur 1.

Der eine Spalt erhält auf diese Weise nur Licht von der Aufnahme F, der andere nur von dem Spiegel G. Dieser wird durch eine unmittelbar hinter dem Nernstkörper befindliche, das Licht desselben diffus reflektierende Platte B aus unglasiertem Porzellan beleuchtet. Da G und F in verschiedenen Ebenen liegen, wird die Aufnahme F unscharf auf dem Spalt abgebildet. Diese Anordnung konnte überall dort benutzt werden, wo es sich lediglich darum handelte, für einen gewissen Bereich der Aufnahme die mittlere Lage und Intensität des Bildes festzustellen, also eine scharfe Abbildung der Aufnahme auf dem Spalt nicht erforderlich war. Der Vorzug dieser Anordnung ist, daß sie die Messung der Lage und Intensität des im Fernrohrokular gesehenen Bildes wesentlich erleichtert, da bei scharfer Abbildung infolge unvermeidlicher Schwankungen beider Größen mit der Stelle der Aufnahme das Bild meistens verzerrt wird. Der Abstand FG wurde gerade so groß gewählt, daß bei der Abbildung in jedem Punkte der Spaltöffnung eine genügend große Anzahl verschiedener Stellen der Aufnahme beteiligt war, um ein gerades Bild von mittlerer Lage und Intensität zu erzeugen.

Zur Erleichterung des Intensitätsvergleichs des von der Aufnahme und dem Spiegel reflektierten Lichts für verschiedene Wellenlängen wurde im Okularbrennpunkte eine spaltförmige Blende K parallel zur Richtung des Doppelspaltes eingesetzt, die nur einen kleinen Wellenbereich freiließ.

C ist ein pneumatischer Verschluß, der in der Zeit, wo nicht beobachtet wurde, verschlossen wurde, um die Aufnahme nach Möglichkeit vor Licht zu schützen.

Bei der Verwendung eines total reflektierenden Prismas ist nicht zu vermeiden, daß das in F einfallende Licht einen Winkel mit dem Einfallslot von F bildet. Dieser Winkel wurde, um eine Farbenverschiebung zu vermeiden, so klein wie irgend möglich gemacht. Zu diesem Zwecke wurde der Abstand des Prismas E von F möglichst groß gewählt und so eingestellt, daß das von F reflektierte Licht noch gerade die Kante des Prismas passierte.

Für die Untersuchung der Intensitätsverteilung im Spektralbilde der Aufnahme einer homogenen Farbe konnte die in Figur 1 skizzierte Anordnung nicht benutzt werden. Es treten nämlich im Spektralbilde von der jeweiligen Schichtdicke abhängige dunkle Interferenzstreifen auf. Deshalb mußte bei diesen Untersuchungen die Aufnahme scharf auf dem Spalt abgebildet werden. Der Spiegel G mußte also in eine Ebene mit der Aufnahme F gebracht werden. Das geschah durch Einfassen von Aufnahme und Spiegel in einen Messingrahmen. Die Erschwerung der Messung, die das bei scharfer Abbildung stets verzerrte Spektralbild bedingt, wird ein wenig durch den Vorteil aufgewogen, daß beim Zusammenfallen der Ebenen von F und G anstatt der Nernstlampe eine (wegen ihres unruhigen Brennens bei Verschiedenheit der Ebenen von F und G nicht verwendbare) Bogenlampe benutzt werden kann. Diese gestattet infolge ihrer bedeutend größeren Intensität die Verwendung einer unter 45^0 gegen die Richtung der optischen Bank geneigten planparallelen Glasplatte anstatt des total reflektierenden Prismas. Diese Anordnung hat den Vorzug, daß sie einen absolut senkrechten Einfall des Lichtes in die Aufnahme zuläßt.

Die Messung wurde in folgender Weise ausgeführt: Die Mitte der Okularblende wurde durch Drehung des Gitters auf eine bestimmte Wellenlänge eingestellt, die durch die Ablesung des Drehungswinkels an einer Winkelskala bestimmt wurde. Während nun die Breite des Spaltes, auf dem die Aufnahme abgebildet war, unverändert gelassen wurde, wurde die Breite des anderen Spaltes so lange verändert, bis die Bilder beider Spalthälften im Okular gleich hell erschienen. Dann lieferte das Verhältnis beider Spaltbreiten das reziproke Verhältnis der Helligkeit der zugehörigen Bilder. Auf diese Weise ist ein Vergleich der Intensitäten des von der Aufnahme und dem Spiegel reflektierten Lichts für die verschiedenen Wellenlängen des in Betracht kommen-

den Wellenlängenbereiches erreicht. Um die Intensitätswerte in Bruchteilen der einfallenden Intensität zu erhalten, ist erst ein Vergleich der vom Spiegel reflektierten Intensität mit derjenigen erforderlich, die von einer Schicht bekannten Reflexionsvermögens reflektiert wird. Zu diesem Zwecke wurde an die Stelle der Aufnahme eine von zwei Spiegelglasplatten vom Brechungsindex $n = 1{,}527$ begrenzte dünne Luftschicht gebracht und an dieser für eine mittlere Wellenlänge die an der Aufnahme vorgenommene Messung wiederholt. Der Abstand der die Luftschicht begrenzenden Glasflächen wurde weit genug gewählt, um Interferenzen auszuschließen. Reflexionen an den äußeren Grenzflächen wurden durch das Eintauchen in Benzol vermieden.

Das Reflexionsvermögen der Luftschicht ist eine aus dem Brechungsindex abzuleitende Größe. Der von einer einzigen Grenzschicht $n = 1{,}527$ reflektierte Bruchteil R der einfallenden Intensität ist nach der Fresnelschen Formel bei senkrechtem Einfall

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = \left(\frac{0{,}527}{2{,}527}\right)^2 = 0{,}0435.$$

Im vorliegenden Falle ist der reflektierte Bruchteil der Intensität mit Rücksicht auf die mehrfachen Reflexionen

$$= 2R(1 - R)$$

zu setzen, also

$$= 0{,}083.$$

Beim Vergleich der für die Aufnahme erhaltenen Spalteinstellungen mit den für die Luftschicht erhaltenen und Berücksichtigung des obigen Wertes für das Reflexionsvermögen der Luftschicht fällt die Intensität der Reflexion am Spiegel heraus und man erhält die an der Aufnahme reflektierte Intensität in Bruchteilen der einfallenden.

Auf diese Weise sind alle im folgenden angegebenen Intensitätswerte gemessen.

Sämtliche Beobachtungen, soweit dies nicht anders angegeben ist, sind von der Glasseite gemacht, auf der das Bild homogener ist. Es hat dies wohl darin seinen Grund, daß der Schwächungskoeffizient r der Reflexionen an zwei aufeinanderfolgenden Elementarspiegeln auf dieser Seite dem Werte 1 näherkommt. Bei der Betrachtung von dieser Seite wiegt nämlich die kräftigere Ausbildung

der Elementarspiegel nach der Oberfläche hin die Verluste durch Absorption und Reflexion auf.[10])

1. Spektralbild der Aufnahme einer homogenen Farbe.

Bei exakter Farbenwiedergabe würde das Spektralbild der Aufnahme einer homogenen Farbe eine Spektrallinie sein. Da eine wesentliche Bedingung für eine wirklich exakte Farbenwiedergabe eine unbegrenzte Anzahl von Elementarspiegeln ist und diese Bedingung niemals streng erfüllt ist, so ist statt der Linie, je nach der Anzahl der vorhandenen Elementarspiegel eine mehr oder minder verbreiterte Spektrallinie zu erwarten.

Häufig treten innerhalb dieser verbreiterten Spektrallinie mehrere dunkle Interferenzstreifen auf. Dieser Fall hat bisher wenig Beachtung gefunden. Er wurde zuerst von Schütt[11]) an Aufnahmen auf dünnen Schichten beobachtet. Auch Wiener[12]) erwähnt den Fall und seine theoretische Begründung, ohne darauf näher einzugehen, da er selbst im allgemeinen mit starker Absorption arbeitete, bei der diese Erscheinung nicht wahrzunehmen ist.[13])

Bei der vorliegenden Untersuchung wurden die Streifen an einer großen Anzahl von Aufnahmen und zwar ebenso häufig an dicken wie an dünnen Schichten beobachtet. Der Wert einer genaueren Untersuchung dieser Interferenzen liegt darin, daß sie eine Möglichkeit an die Hand geben, die Anzahl der Elementarspiegel und die Schwächung des einfallenden Lichtes beim Durchgang durch einen einzelnen Elementarspiegel zu bestimmen.

Der von Wiener[14]) und Meslin[15]) an allen Aufnahmen beobachtete dunkle Interferenzstreifen ist von diesen wohl zu unterscheiden. Der erstere entsteht unter dem Einfluß der Oberflächenreflexion und verschwindet mit dieser, während die letzteren auch bei Entfernung der Oberflächenreflexion bestehen bleiben.

Im allgemeinen wird zur Entfernung der Oberflächenreflexion die Aufnahme in Benzol eingetaucht. Nun kann man nicht erwarten, daß die optische Dichte an der Oberfläche der entwickelten Schicht bei verschiedenen Aufnahmen genau dieselbe ist. Mehr aber fällt noch ins Gewicht, daß der Brechungsindex der benutzten Speisegelatine, ca. den Wert 1,6 hat (vgl. Tabelle VII, S. 33), während der des Benzols nur 1,5 beträgt. Es werden infolgedessen bei Verwendung von Benzol noch Reste von Oberflächenreflexion vorhanden sein.

Deshalb wurden durch Mischungen von Alkohol und Schwefelkohlenstoff in den verschiedensten Verhältnissen Lösungen der verschiedensten optischen Dichte hergestellt und ein und dieselbe Aufnahme nacheinander in diesen beobachtet. Die erwähnten Interferenzstreifen verschwanden aber in keinem Falle und änderten auch ihre Lage und Intensität nicht merklich.

Das beweist die Unabhängigkeit der Entstehung dieser Interferenzstreifen von der Oberflächenreflexion.

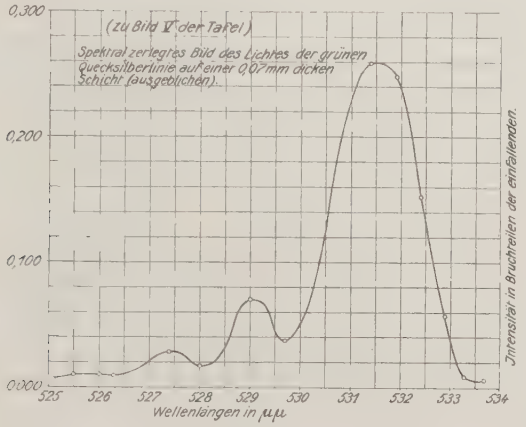
Daß es sich nicht etwa um Interferenzen handelt, die durch Beteiligung der Reflexion an der Grenze Glas-Schicht entstehen, beweisen die Bilder I, II und IV der Taf. I. Bei der Herstellung aller dieser Bilder wurde die Grenze des belichteten Teiles der Schicht scharf auf dem Spalt des Gitterspektrographen abgebildet, so daß der obere Teil des Bildes das vom belichteten Teile, der untere Teil das vom unbelichteten Teile der Schicht reflektierte Licht in spektraler Zerlegung zeigt.

Der untere Teil der drei Bilder zeigt ein schwaches Interferenzensystem, die sogenannten Dickenkurven, die durch Interferenz des an beiden Grenzen der Schicht reflektierten Lichtes entstehen. Das Auftreten der Dickenkurven ist ein Zeichen dafür, daß trotz des Eintauchens in Benzol noch eine schwache Reflexion an der Oberfläche der Schicht vorhanden ist.

Der obere Teil aller drei Bilder zeigt (besonders deutlich in Bild II) zwei Systeme von Interferenzstreifen. Da die Elementarspiegel der Oberfläche parallel laufen, hat die an ihnen reflektierte Gesamtwelle an den verschiedenen Stellen der Aufnahme annähernd die gleiche Phasendifferenz gegen die Oberflächenwelle. Interferenzen dieser Gesamtwelle mit der von der Grenze Glas-Schicht reflektierten Welle müssen also in derselben Richtung verlaufen wie die Dickenkurven. Tatsächlich ist das eine Interferenzensystem der oberen Hälfte nur eine Fortsetzung der Dickenkurven. Das andere Interferenzensytem dagegen — auf das es hier ankommt — ist annähernd spaltparallel und wird von dem ersten durchschnitten, muß also auf ganz andere Weise zustande kommen.

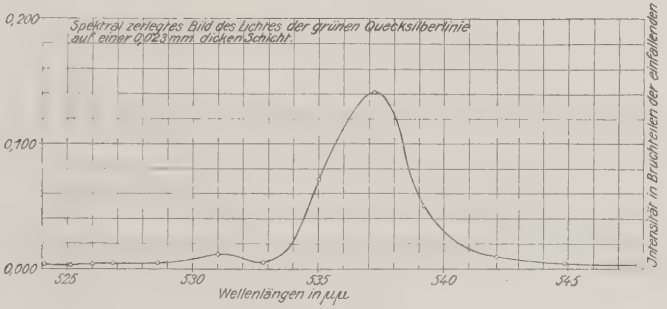
Die Bilder I und II der Taf. I sind spektral zerlegte Aufnahmen des Lichtes der grünen Quecksilberlinie auf Lehmannplatten, IV und V spektral zerlegte Aufnahmen desselben Lichtes auf dickeren Schichten. Während in I und II die Minima des betrachteten Interferenzensystems ziemlich weit auseinanderliegen, ist ihr Abstand in IV und besonders in V wesentlich kleiner. Deshalb kann man bei dünnen

Schichten die Minima schon mit einem einfachen Taschenspektroskop erkennen, während sie bei dickeren Schichten erst durch eine stärkere Auflösung getrennt werden.



Figur 2.

Figur 2, 3 und 4 zeigen den durch diese Minima zustande kommenden Intensitätsverlauf des Spektralbildes in der Richtung

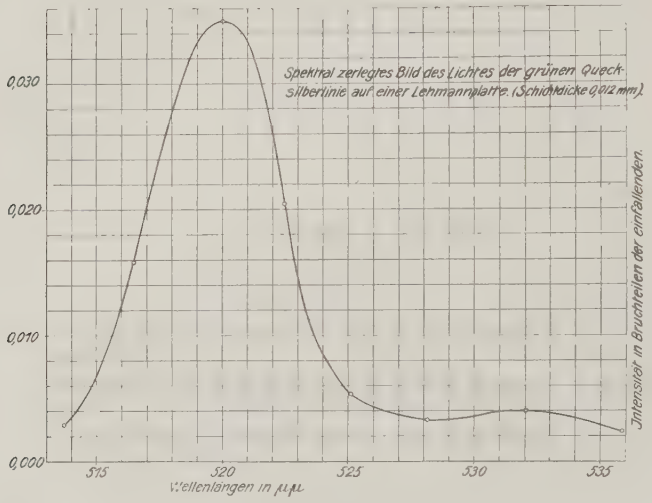


Figur 3.

senkrecht zu den Spektrallinien bei drei verschiedenen Aufnahmen des Lichtes der grünen Quecksilberlinie auf Schichten von verschiedener Dicke.[16]) Bei diesen Messungen wurden die Schichten absichtlich nicht auf den Feuchtigkeitsgrad gebracht, bei dem die Aufnahmen hergestellt worden waren, wie das später bei der Vergleichung der Wellenlängen geschah (s. S. 29); denn allmählich findet auch durch das Benzol hindurch ein Feuchtigkeitsausgleich mit der Zimmerluft statt, der eine Verschiebung des Bildes während der Mes-

sung bewirken würde, und bei der Feststellung des Intensitätsverlaufs im Spektralbilde mußte vor allen Dingen die Möglichkeit einer solchen Verschiebung ausgeschaltet werden. Für die Vergleichung der Wellenlänge des Bildes mit der des aufgenommenen Lichtes können diese Kurven also nicht in Frage kommen.

Figur 2 zeigt den Intensitätsverlauf bei Verwendung einer 0,07 mm dicken Schicht (Bild V der Taf. I). Die Kurve ist in der Weise entstanden, daß die Okularblende auf alle Maxima und Minima eingestellt wurde und bei gleichzeitiger Bestimmung der Wellenlänge



Figur 4.

durch die Winkelskala die Werte der Intensität an diesen Stellen gemessen wurden. Nur jenseits des ersten und letzten Maximums wurde in regelmäßigen Wellenlängenabständen der Wert der Intensität bestimmt. Dieses Verfahren wurde mehrere Male durch die ganze Intensitätskurve hindurch wiederholt. Die ganze Kurve durch Messung der Intensität in regelmäßigen Wellenlängenabständen zu bestimmen, erwies sich deshalb als unausführbar, weil dann die Maxima bezw. Minima in der Regel nur zum Teil in die Okularblende fielen und kein homogenes Gesichtsfeld erzielt wurde; eine Verkleinerung der Blende aber war mit Rücksicht auf eintretende Beugungserscheinungen ausgeschlossen.

Figur 3 zeigt den Intensitätsverlauf bei Verwendung einer 0,023 mm dicken Schicht, Figur 4 bei Verwendung einer Lehmann-

schen Schicht (Dicke 0,012 mm). Diese Kurven sind in der gleichen Weise entstanden wie die Kurve 2, nur das hier noch Intensitätswerte zwischen dem ersten Maximum und dem ersten Minimum gemessen werden konnten.

In Figur 2 sind neben dem Hauptmaximum bei $\lambda = 531{,}4\ \mu\mu$ noch deutlich zwei Nebenmaxima bei $\lambda = 529{,}0\ \mu\mu$ und $\lambda = 527{,}4\ \mu\mu$ zu erkennen. Nach der langwelligen Seite fällt die Intensität rasch ab ohne Nebenmaxima zu bilden. In Figur 3 ist nur ein Nebenmaximum auf der kurzwelligen Seite, in Figur 4 nur eins auf der langwelligen Seite vorhanden. Alle drei Kurven sind nach beiden Seiten bis zu einem Punkte verfolgt, jenseits dessen keine Intensitätsunterschiede mehr zu erkennen waren. Kurve 4 ist wegen der geringen Intensitäten unsicher. Sie ist kurz hinter dem zweiten Maximum abgebrochen, da das Auge bei so geringer Intensität leicht Täuschungen unterliegt und eine weitere Verfolgung höchstens ein falsches Bild von der Gestalt der Kurve geben würde. Außerdem genügte für die weitere Untersuchung die Feststellung der Intensitäten des ersten Maximums, ersten Minimums und zweiten Maximums.

In Wirklichkeit sind bei allen drei Aufnahmen mehr Nebenmaxima vorhanden als die Kurven aufweisen. Im besonderen weisen die zu Kurve 3 und 4 gehörigen Aufnahmen Nebenmaxima auf beiden Seiten des Hauptmaximums auf. Sie sind durch den Kontrast in der Photographie des Spektralbildes (siehe Bild II, IV und V der Taf. I) und beim Weglassen der Okularblende *K* (Figur 1) auch bei direkter Beobachtung zu erkennen. Bei der Intensitätsmessung kommen sie infolge der geringen Helligkeit nicht mehr zur Geltung, aber ihre Lage konnte leicht mittels des Fadenkreuzes festgestellt werden. Nur die Photographie des Spektralbildes der zu Kurve 2 gehörigen Aufnahme weist allein auf der kurzwelligen Seite Nebenmaxima auf (Bild V der Taf. I).

Jedenfalls geht aus den Kurven und den Photographien hervor, daß die Nebenmaxima in der Regel nicht auf beiden Seiten des Hauptmaximums in gleicher Weise, sondern bald auf der kurzwelligen, bald auf der langwelligen Seite kräftiger ausgebildet sind. Bei allen beobachteten Aufnahmen der Lehmannplatten war die Seite kräftigerer Ausbildung der Nebenmaxima die langwellige, bei den Aufnahmen auf den selbsthergestellten Platten (s. S. 44) die kurzwellige. Dieses verschiedene Verhalten verschiedener Aufnahmen, ferner die Tatsache, daß Ausbleichen der Aufnahmen keinen Einfluß

auf die Erscheinung hat, schließen eine Erklärung der unsymmetrischen Form des Spektralbildes durch die Absorption des Silbers aus. Vielleicht könnte sie durch die einseitige Wirkung des Entwicklers erklärt werden. Hierauf wird später noch einmal ausführlicher eingegangen.

Ausgeblichene Aufnahmen zeigen stets Minima (Bild I, IV und V), unausgeblichene nicht immer. Während bei den ausgeblichenen Aufnahmen die Minima bei der Betrachtung von beiden Seiten ungefähr gleich deutlich sichtbar sind, zeigen unausgeblichene Aufnahmen fast ausschließlich bei der Betrachtung von der Glasseite Minima (Bild II und III). Mit abnehmender Intensität des Bildes nimmt auch die Anzahl der sichtbaren Minima ab, wohl bloß die Folge des Herabsinkens der Nebenmaxima unter den Schwellenwert der Sichtbarkeit. So ruft geringe Intensität des Bildes häufig den Eindruck großer Homogenität hervor, wie das in Bild VI der Fall ist.

Die Tatsache, daß die Minima bei ausgeblichenen Aufnahmen immer, bei unausgeblichenen in der Regel nur bei der Betrachtung von der Glasseite auftreten, also in den Fällen, in denen der Schwächungskoeffizient r nicht viel von 1 verschieden ist (s. S. 16), legt die Erklärung nahe, daß sie die Folge einer beträchtlichen Mitwirkung der tiefer liegenden Elementarspiegel sind. Diese drückt sich nämlich mathematisch, wenn m die Anzahl der Elementarspiegel ist und die Amplitude der am ersten Elementarspiegel reflektierten Welle gleich 1 gesetzt wird, in dem Amplitudenwerte r^m der am letzten[17]) Elementarspiegel reflektierten Welle aus. Ist r nun nahezu gleich 1, so kann selbst bei einer großen Anzahl m der Elementarspiegel der Wert von r^m noch einen beträchtlichen Bruchteil von 1 repräsentieren. Die Reflexion am letzten Elementarspiegel darf dann neben der am ersten nicht mehr vernachlässigt werden, was bei den bisherigen theoretischen Betrachtungen meist geschehen ist.

Anstatt der Amplitude der am ersten Elementarspiegel reflektierten Welle soll die Amplitude der in die Aufnahme einfallenden Welle als Einheit gewählt werden. In diesem Maßstabe bezeichne ϱ die Amplitude der vom ersten Elementarspiegel reflektierten Welle, deren Phase als 0 Phase gewählt werde.

Bei Berücksichtigung der Reflexion am letzten Elementarspiegel ist dann für eine bestimmte Wellenlänge λ' des Spektralbildes die von der Aufnahme reflektierte Gesamtwelle durch folgenden Ausdruck bestimmt:

$$R \cdot e^{iA} = \varrho \frac{1 - r^m e^{im\alpha}}{1 - r \cdot e^{i\alpha}}$$ [18]).

Hierin bedeutet R die Amplitude, A die Phasendifferenz der Gesamtwelle gegen die vom ersten Elementarspiegel reflektierte Welle und α die Phasendifferenz zweier von aufeinanderfolgenden Elementarspiegeln reflektierten Wellen, d. h. es ist, wenn λ die Wellenlänge des Hauptmaximums ist

$$\alpha = 2\pi \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda'}.$$

Hieraus ergibt sich für die Intensität der Wellenlänge λ' im Spektralbilde der Ausdruck

a) $$J = R^2 = \varrho^2 \cdot \frac{1 - 2r^m \cdot \cos m\alpha + r^{2m}}{1 - 2r\cos\alpha + r^2}.$$

Der Zähler des Ausdrucks a) liefert Minima für die Werte

$$m\alpha = 2k\pi \qquad k = 1, 2, 3, \ldots\ldots\ldots$$

b) Maxima für die Werte

$$m\alpha = (2k + 1)\pi \qquad k = 1, 2, 3, \ldots\ldots\ldots$$

Die Werte von α für die verschiedenen Maxima und Minima nehmen folglich mit wachsender Anzahl der Elementarspiegel ab, d. h. die Maxima und Minima rücken mit zunehmender Dicke mehr zusammen, in Übereinstimmung mit der Beobachtung.

Das Hauptmaximum wird im wesentlichen durch den Nenner für $\alpha_1 = 0$ bestimmt, während der Nenner auf die anderen Maxima und Minima nur einen außer acht zu lassenden Einfluß ausübt.

Ist λ' für ein Minimum bezw. Maximum von der Ordnungszahl k bekannt, so folgt die Anzahl der Elementarspiegel aus der Gleichung

$$m = k \cdot \frac{\lambda'}{\lambda - \lambda'} \text{ für alle Minima}$$

c) und

$$m = \frac{2k + 1}{2} \cdot \frac{\lambda'}{\lambda - \lambda'} \text{ für alle Maxima.}$$

Die Werte von m, die sich für die verschiedenen Aufnahmen beim Einsetzen der Wellenlängen der Maxima und Minima in diese Gleichungen ergeben, gehen aus der folgenden Tabelle I hervor.

Tabelle I.

Aufnahme Kurve 2 (Bild V)

beim Einsetzen der Wellenlänge des		Anzahl der Elementarspiegel	
ersten Minimums	$\lambda' = 529{,}7\ \mu\mu$	$m = 312$	Wellenlänge des ersten Maximums $\lambda = 531{,}4\ \mu\mu$
zweiten Maximums	$\lambda' = 529{,}0\ \mu\mu$	311	
zweiten Minimums	$\lambda' = 528{,}0\ \mu\mu$	331	
dritten Maximums	$\lambda' = 527{,}4\ \mu\mu$	330	
		Mittel $m = 321$	

Aufnahme Kurve 3

beim Einsetzen der Wellenlänge des		Anzahl der Elementarspiegel	
ersten Minimums	$\lambda' = 532{,}8\ \mu\mu$	$m = 120$	Wellenlänge des ersten Maximums $\lambda = 537{,}2\ \mu\mu$
zweiten Maximums	$\lambda' = 531{,}0\ \mu\mu$	128	
zweiten Minimums	$\lambda' = 528{,}6\ \mu\mu$	123	
dritten Maximums	$\lambda' = 526{,}8\ \mu\mu$	127	
		Mittel $m = 125$	

Aufnahme Kurve 4 (Lehmannplatte)

beim Einsetzen der Wellenlänge des		Anzahl der Elementarspiegel	
ersten Minimums	$\lambda' = 528{,}2\ \mu\mu$	$m = 64$	Wellenlänge des ersten Maximums $\lambda = 520{,}0\ \mu\mu$
zweiten Maximums	$\lambda' = 532{,}0\ \mu\mu$	67	
zweiten Minimums	$\lambda' = 535{,}9\ \mu\mu$	67	
dritten Maximums	$\lambda' = 540{,}0\ \mu\mu$	68	
		Mittel $m = 67$	

Der Wert des Schwächungskoeffizienten r ergibt sich zufolge a) z. B. aus dem Intensitätverhältnis des Maximums bei $\alpha = 0$ und der Minima oder auch aus dem Intensitätsverhältnis der durch b) definierten Maxima, in beiden Fällen unabhängig von der Anzahl der Elementarspiegel, da r^m herausfällt. Die Intensitätsverhältnisse an diesen Stellen sind also die gleichen wie im Falle $r^m = 0$. Aus der Intensität i' des ersten Minimums bei $m\alpha' = 2\pi$ und der Intensität J_1 des Hauptmaximums bei $\alpha_1 = 0$ ergibt sich z. B.

$$\frac{i'}{J_1} = \frac{(1-r)^2}{1 - 2r\cos\alpha' + r^2},$$

woraus für r der Ausdruck

$$r = 1 + c - \sqrt{2c + c^2}$$

folgt, worin

$$c = \frac{2i'}{J_1 - i'} \sin^2 \frac{\alpha'}{2}$$

ist.

Mit Rücksicht auf den kleinen Wert von c darf man

d) $$r = 1 - \sqrt{2c} = 1 - 2\sqrt{\frac{i'}{J_1 - i'}} \sin\frac{\alpha'}{2}$$ setzen.

Die Ableitung des Wertes von r aus dem Intensitätsverhältnis $\frac{J_1}{J_2}$ des Hauptmaximums bei $\alpha_1 = 0$ und des Maximums bei $m\,\alpha_2 = 3\pi$ oder aus dem Intensitätsverhältnis $\frac{i'}{J_2}$ des Minimums bei $m\,\alpha' = 2\pi$ und des Maximums bei $m\,\alpha_2 = 3\pi$ kann nur durch Annäherung erfolgen, da hier r^m in die Gleichung eingeht.

Im ersten Falle erhält man für r^m den Ausdruck

e) $$r^m = \frac{c - (1 - r)}{c + (1 - r)},$$

worin

$$c = \sqrt{\frac{J_2}{J_1}\left((1 - r)^2 + 4r \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}\right)}$$

zu setzen ist.

Im zweiten Falle erhält man

f) $$r^m = \frac{c - 1}{c + 1},$$

worin

$$c = \sqrt{\frac{J_2}{i'} \frac{(1 - r)^2 + 4r \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}}{(1 - r)^2 + 4r \sin^2 \frac{\alpha'}{2}}}$$

zu setzen ist.

In e) ist als vorläufiger Wert für r der aus d) sich ergebende einzusetzen. In f) darf man bei einer nicht zu großen Anzahl von Elementarspiegeln, also relativ großen Werten von α_2 und α' das immer sehr kleine $(1 - r)^2$ vernachlässigen und für c schreiben

f') $$c = \sqrt{\frac{J_2}{i'} \frac{\sin \frac{\alpha_2}{2}}{\sin \frac{\alpha'}{2}}}.$$

Sonst setzt man auch hier den aus d) oder den aus f') erhaltenen Wert für r als vorläufigen Wert in die Gleichung ein.

Ergeben die Gleichungen e) und f) einen anderen Wert für r als den eingesetzten, stimmen also die aus $\frac{i'}{J_1}$, $\frac{J_2}{J_1}$ und $\frac{J_2}{i'}$ sich ergebenden Werte für r nicht untereinander überein, so muß man den eingesetzten Wert von r solange ändern, bis er sich mit dem aus den Gleichungen e) und f) erhaltenen deckt. Man sieht sofort, in welcher Richtung man r zu ändern hat, um dies zu erreichen. Im allgemeinen wird man in f) mit der Annäherung $(1 - r)^2 = 0$ auskommen.

Der Berechnung der im folgenden angegebenen Werte von r sind nicht die beobachteten Wellenlängen der Maxima und Minima, sondern die dem berechneten mittleren Werte von m entsprechenden Wellenlängen zugrunde gelegt, die sich ein wenig von den beobachteten unterscheiden.

Wie man aus der Tabelle II sieht, weichen die aus den verschiedenen Gleichungen berechneten Werte von r ziemlich erheblich voneinander ab,

Tabelle II.

1. Ausgeblichene Aufnahme: Kurve 2.
Anzahl der Elementarspiegel $m = 321$
$J_1 = 0{,}259 \quad i' = 0{,}037 \quad J_2 = 0{,}070$

Wert von r	berechnet aus
0,9920	d) J_1 und i'
0,9825	e) J_1 und J_2
0,9967	f) J_2 und i'

2. Unausgeblichene Aufnahme: Kurve 3.
Anzahl der Elementarspiegel $m = 125$
$J_1 = 0{,}141 \quad i' = 0{,}005 \quad J_2 = 0{,}011$

Wert von r	berechnet aus
0,9904	d) J_1 und i'
0,9832	e) J_1 und J_2
0,9923	f) J_2 und i'

3. Unausgeblichene Aufnahme auf einer Lehmannplatte: Kurve 4.
Anzahl der Elementarspiegel $m = 67$
$J_1 = 0{,}0350 \quad i' = 0{,}0032 \quad J_2 = 0{,}0039$

Wert von r	berechnet aus
0,9707[19])	d) J_1 und i'
0,9565	e) J_1 und J_2
0,9789	f) J_2 und i'

und zwar haben die Abweichungen überall die gleiche Richtung. Der aus f) erhaltene Wert für r ist größer als der aus d) erhaltene.

Der aus d) berechnete Wert von r wächst mit $\frac{J_1}{i'}$, der aus f) berechnete mit $\frac{J_2}{i'}$. Ist also der aus f) erhaltene Wert von r größer als der aus d) erhaltene, so bedeutet das eine Abweichung der Erscheinung von der Theorie im Sinne eines zu großen Intensitäts-

wertes des zweiten Maximums im Verhältnis zu dem des Hauptmaximums.

Bei den Aufnahmen Kurve 2 und 4 läßt theoretisch das Verhältnis $\frac{i'}{J_1}$ in Verbindung mit dem sich aus c) ergebenden Werte für m überhaupt kein zweites Maximum bei $m\alpha_2 = 3\pi$ zu.

Am besten stimmen die Intensitätsverhältnisse bei der Kurve 3. Hier würden sich

$$\text{statt der Werte } \begin{matrix} J_1 = 0{,}141 \\ i' = 0{,}005 \\ J_2 = 0{,}011 \end{matrix} \quad \text{die Werte } \begin{matrix} J_1 = 0{,}141 \\ i' = 0{,}008 \\ J_2 = 0{,}011 \end{matrix}$$

den Gleichungen d), e) und f) vollständig anpassen. In der Intensitätskurve 2 würden bei der Beibehaltung des Wertes von J_1 und des Intensitätsverhältnisses $\frac{J_2}{i'}$

$$\text{statt } \begin{matrix} J_1 = 0{,}259 \\ i' = 0{,}037 \\ J_2 = 0{,}070 \end{matrix} \quad \text{die Werte } \begin{matrix} J_1 = 0{,}259 \\ i' = 0{,}007 \\ J_2 = 0{,}014 \end{matrix}$$

die Gleichungen befriedigen.

In der Intensitätskurve 4

$$\text{statt } \begin{matrix} J_1 = 0{,}0350 \\ i' = 0{,}0032 \\ J_2 = 0{,}0039 \end{matrix} \quad \text{die Werte } \begin{matrix} J_1 = 0{,}0350 \\ i' = 0{,}0017 \\ J_2 = 0{,}0021 \end{matrix}$$

Bei der Kleinheit der Intensitäten, um die es sich hier handelt, mögen diese Abweichungen, zumal in Kurve 4, durch Messungsfehler etwas verfälscht sein. Die Übereinstimmung in der Richtung der Abweichungen in allen drei Kurven beweist aber das Vorhandensein einer gemeinsamen sie bedingenden Ursache. Man muß daraus schließen, daß sich die experimentellen Bedingungen nicht vollständig mit den theoretischen Voraussetzungen decken. Hierauf weist auch schon die einseitig kräftigere Ausbildung der Nebenmaxima hin.

Hier kommt zunächst die Annahme der Konstanz von r in Frage, die nicht erfüllt zu sein braucht. Es ist vielmehr wahrscheinlich, daß sich der Wert von r mit der Tiefe ändert, da die Wirkung des Entwicklers in der Tiefe vermutlich keinem einfachen Gesetze gehorcht. Auch die Voraussetzung einer symmetrischen Form der Elementarspiegel bei spektral symmetrischer Lichtwirkung braucht nicht erfüllt zu sein.

Ohne diese beiden Voraussetzungen ist allerdings die mathematische Betrachtung kaum durchführbar. Man erkennt aber auch ohne exakte mathematische Betrachtung, daß eine unsymmetrische Form der Elementarspiegel eine unsymmetrische Form des Spektralbildes zur Folge haben kann.

Nehmen wir einmal an, daß eine Spektrallinie von merklicher Breite photographiert wird, deren Intensität nach Blau zu stärker abfällt als nach Rot. Wie würden die Elementarspiegel aussehen, die eine solche Linie erzeugen würde?

Die Breite der Linie an sich würde bedingen, daß die Elementarspiegel mit wachsender Entfernung von der Schichtoberfläche breiter werden. Der stärkere Abfall der Intensität nach Blau zu würde einen stärkeren Dichteabfall des Silberniederschlages innerhalb der einzelnen Elementarspiegel nach der Schichtoberfläche hin bedingen. Ein stärkerer Intensitätsabfall der Spektrallinie nach Rot zu würde einen stärkeren Dichteabfall des Silberniederschlages nach der Glasseite hin zur Folge haben.

Im ersteren Falle stimmt die Richtung von der Seite stärkeren nach der Seite allmählicheren Dichteabfalls des Silberniederschlages innerhalb der einzelnen Elementarspiegel überein mit der Richtung zunehmender Breite der Elementarspiegel; im zweiten Falle sind beide Richtungen entgegengesetzt.

Umgekehrt würden Elementarspiegel von dieser Gestalt die entsprechenden unsymmetrischen Spektralbilder erzeugen.

Es fragt sich nun, wie aus den Elementarspiegeln die normalerweise durch die zur Abbildung gelangte grüne Quecksilberlinie erzeugt werden, solche entstehen können, die den beschriebenen ähnlich verlaufen. Die Breite der grünen Quecksilberlinie ist so gering, daß sie keine merkliche Zunahme der Breite der Elementarspiegel mit wachsender Entfernung von der Schichtoberfläche zur Folge haben kann. Es könnte aber eine Zunahme der Breite der Elementarspiegel nach der Schichtoberfläche hin durch das einseitige Eindringen des Entwicklers bedingt werden. Durch dieselbe Ursache könnten auch Unsymmetrien im Aufbau der einzelnen Elementarspiegel hervorgerufen werden, indem je nach der Art des verwendeten Entwicklers der Schwerpunkt der photographischen Wirkung von der Bauchebene nach der einen oder anderen Seite hin verschoben wird. Das Zusammenwirken dieser beiden Umstände würde die Entstehung von Elementarspiegeln der oben beschriebenen Form, also ein unsymmetrisches Spektralbild bedingen.

Eine andere mögliche Erklärung wäre die, daß durch eine oberflächlich stärkere Gerbung der Gelatine durch das Pyrogallol verschiedene Abstände der Elementarspiegel an der Oberfläche und in der Tiefe erzeugt werden. Auch dadurch könnte ein unsymmetrisches Spektralbild zustande kommen.

Es ist ohne weiteres klar, daß Vorgänge bei der Entwicklung, die das Spektralbild unsymmetrisch machen, auch die Intensitätsverhältnisse der Maxima und Minima verschieben müssen, also auch die bei diesen gefundenen Abweichungen von der Theorie so erklärt werden könnten.

Daß es sich um Entwicklerwirkungen und nicht etwa um rein optische Erscheinungen handelt, dafür spricht das verschiedene Verhalten der selbsthergestellten und der Lehmannschen Platten (s. S. 21), die verschieden entwickelt wurden, nämlich die ersten mit reiner Pyrogallollösung, die letzteren nach Lehmanns Vorschrift mit Zusatz von Ammoniak und Bromkali.

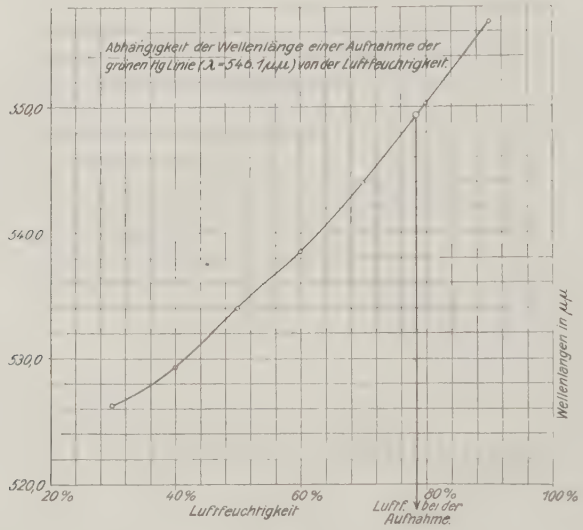
Sich genauere Vorstellungen über die Vorgänge bei der Entwicklung zu bilden, wäre verfrüht, solange keine diesbezüglichen Experimente vorliegen.

2. Wellenlänge des Bildes einer homogenen Farbe.

Unter der Wellenlänge des Bildes einer homogenen Farbe schlechtweg ist die Wellenlänge größter Intensität im Spektralbilde der Aufnahme, also in dem unter 1 beschriebenen Falle die Wellenlänge des Hauptmaximums zu verstehen.

Bevor man an eine Vergleichung der wiedergegebenen mit der aufgenommenen Wellenlänge herangeht, muß man den Einfluß der Luftfeuchtigkeit ausschalten. Zu diesem Zwecke wurde ein geschlossener, vorn mit einer Glasschiebetür versehener Holzschrank benutzt, innerhalb dessen die Luftfeuchtigkeit durch Einblasen von trockener oder feuchter Luft reguliert und an einem Lambrecht-Hygrometer durch die Glastür hindurch abgelesen werden konnte. Unmittelbar vor der Beobachtung wurde in diesen die mit Benzol gefüllte Kuvette hineingestellt und die Aufnahme darüber an einer verschiebbaren Klammer befestigt. Dann wurde die Tür geschlossen und der Luftfeuchtigkeitsgrad in den Schrank hergestellt, bei dem die Aufnahme gemacht worden war. War dieser erreicht, so wurde die Aufnahme durch eine geeignete Vorrichtung von außen in die Kuvette eingetaucht. Dann wurde die Kuvette mit der Aufnahme

aus dem Schrank herausgenommen. Im Benzol ändert sich der Feuchtigkeitsgehalt der Gelatine nur sehr langsam, so daß man die Kuvette herausnehmen und die Aufnahme beobachten kann, ohne daß dabei eine Verschiebung der Wellenlänge eintritt.



Figur 5.

Figur 5 zeigt die auf diese Weise gemessene Abhängigkeit der Wellenlänge des Bildes von der Luftfeuchtigkeit zwischen 30 und 90 % Feuchtigkeit. Die Änderung der Wellenlänge in diesem Intervalle beträgt ca. 6 %, eine Verschiebung, die schon eine sichtbare Änderung der Farbennuance zur Folge haben muß. Da derartige Änderungen der Luftfeuchtigkeit vorkommen, z. B. im Winter beim Übergang von geheitzten Räumen ins Freie, so ist dieser Eigenschaft der Lippmannphotographie im Falle irgendeiner Art von praktischer Anwendung Rechnung zu tragen. Die Verwendung von nicht hygroskopischen Substanzen als Bindemittel bietet wenig Aussicht auf Erfolg, da die Entwicklung durch diese sehr erschwert wird.

Die folgende Tabelle III enthält die Wellenlängen der auf einer Anzahl dicker Schichten hergestellten Bilder der Natriumlinie und der grünen Quecksilberlinie, bei der gleichen Luftfeuchtigkeit aufgenommen und beobachtet.

Die Abweichung des Mittels von der aufgenommenen Wellenlänge ist sehr gering. Die durchschnittliche Abweichung der Wellenlängen der einzelnen Bilder von der aufgenommenen beträgt noch nicht 1 %.

Tabelle III.

Wellenlänge des Bildes der Na-L. ($\lambda = 589{,}3\,\mu\mu$) in $\mu\mu$	Abweichung von d. aufgenommenen Wellenlänge in $\mu\mu$	Wellenlänge des Bildes der gr. Hg-L. ($\lambda = 546{,}1\ \mu\mu$) in $\mu\mu$	Abweichung von d. aufgenommenen Wellenlänge in $\mu\mu$
—[20])	—	549,3	3,2
—	—	538,8	7,3
—	—	543,7	2,4
—	—	543,7	2,4
584,9	4,4	541,5	4,6
589,4	0,1	545,1	1,0
589,7	0,4	547,1	1,0
603,2	13,9	558,3	12,2
580,5	8,8	537,7	8,4
Mittel 589,5	5,5	545,0	4,7

Es wäre denkbar, daß die Änderung der Belichtungs- und Entwicklungszeit, ferner die Superposition einer zweiten Periode Einfluß auf die Wellenlänge haben, denn durch alle diese Ursachen kann der Brechungsindex der Aufnahme beeinflußt werden. Deshalb wurden in dieser Richtung Versuche angestellt.

Tabelle IV enthält die Wellenlängen der Bilder der grünen Quecksilberlinie bei verschiedenen Belichtungszeiten. Die zweite Kolonne gibt die Wellenlängen derselben Aufnahme bei Superposition der Natriumlinie mit 30 und 60 Minuten Belichtungsdauer an.

Tabelle IV.

Wellenlänge des Bildes der grünen Hg-Linie in $\mu\mu$		
Belichtungszeit		bei Superposition der Na-Linie mit 30 Minuten Belichtungsdauer
2 Min.	544,6	544,1
5 Min.	547,4	547,1
10 Min.	545,7	543,7
20 Min.	547,1	546,8
40 Min.	545,9	543,5
		bei Superposition der Na-Linie mit 60 Minuten Belichtungsdauer
2 Min.	546,2	547,3
5 Min.	545,9	548,1
10 Min.	546,8	546,2
20 Min.	547,9	546,7
40 Min.	546,8	547,3

Die Abweichungen der Wellenlängen bei verschiedenen Belichtungszeiten haben offenbar keine bestimmte Tendenz. Sie sind von

derselben Größenordnung wie diejenigen, die innerhalb ein und desselben in seiner ganzen Ausdehnung in gleicher Weise belichteten und entwickelten Feldes vorkommen und die die Folgen unvermeidlicher Ungleichmäßigkeiten beim Entwicklungsprozeß sind. Ebenso verhält es sich mit den Abweichungen der Werte der zweiten von denen der ersten Kolonne.

Die Änderung der Belichtungszeit hat also offenbar innerhalb weiter Grenzen keinen Einfluß auf die Wellenlänge des Bildes. Desgleichen die Superposition einer zweiten Periode.

Tabelle V enthält die Wellenlängen der Bilder der grünen Quecksilberlinie bei verschieden kombinierten Entwicklungs- und Belichtungszeiten.

Tabelle V.

Wellenlänge des Bildes der grünen Hg-Linie in $\mu\mu$.

Belichtungszeit	Entwicklungszeit				
	$^1/_2$ Min.	1 Min.	2 Min.	4 Min.	8 Min.
5 Min.	—	542,1	544,8	544,0	546,8
10 Min.	539,2	544,4	544,9	545,4	546,0
20 Min.	542,6	544,0	544,1	544,9	545,4
40 Min.	542,2	544,0	542,7	542,6	541,8
Mittel	541,3	543,6	544,1	544,2	545,0

Hier macht sich im Mittel ein schwaches Anwachsen der Wellenlänge mit zunehmender Entwicklungszeit bemerkbar.

Einen wie großen Einfluß das Fixieren auf die Wellenlänge des Bildes hat, zeigt die folgende Tabelle VI, die die Wellenlängen der grünen Quecksilberlinie bei verschiedener Behandlungsweise derselben Aufnahme angibt.

Tabelle VI.

Wellenlänge des Bildes der grünen Hg-Linie bei verschiedener Behandlungsweise derselben Aufnahme in $\mu\mu$

nur entwickelt	538,8
entwickelt und fixiert	503,4
entwickelt und ausgeblichen	540,2
entwickelt, fixiert und ausgeblichen	504,6

Die Verschiebung der Wellenlänge durch die Fixage erfolgt stets in der Richtung kleinerer Wellenlängen. In dem obigen Falle betrug sie etwa 7 % der Wellenlänge. Ausbleichen der Aufnahme mit $HgCl_2$ bewirkt in der Regel eine geringe Verschiebung des Bildes in der Richtung größerer Wellenlängen.

Daß die Änderung der optischen Länge durch Herauslösen des Bromsilbers allein die Ursache der starken Verschiebung der Wellenlänge beim Fixieren ist, ist unwahrscheinlich. Dazu ist der Unterschied der Brechungsindizes der unbelichteten Schicht und der benutzten Speisegelatine zu gering, wie man aus der folgenden Tabelle VII sieht.

Tabelle VII.

Brechungsindizes für mittleres weißes Licht, mittels der Interferenzmethode von Wernicke[21]) und der Dickenbestimmungsmethode von Wiener[22]) gemessen.[23])

	in trockner Luft	in feuchter Luft
Reine Speisegelatine	1,6101	1,5965
unbelichtete Schicht	1,6165	1,5989
belichtete, entwickelte und ausgeblichene Schicht[24])	1,6123	1,5981

Vielleicht ist die Verschiebung der Wellenlänge beim Fixieren der Aufnahme auf ein durch das Herauslösen des unbelichteten Bromsilbers verursachtes Zusammenfallen der Schicht zurückzuführen.

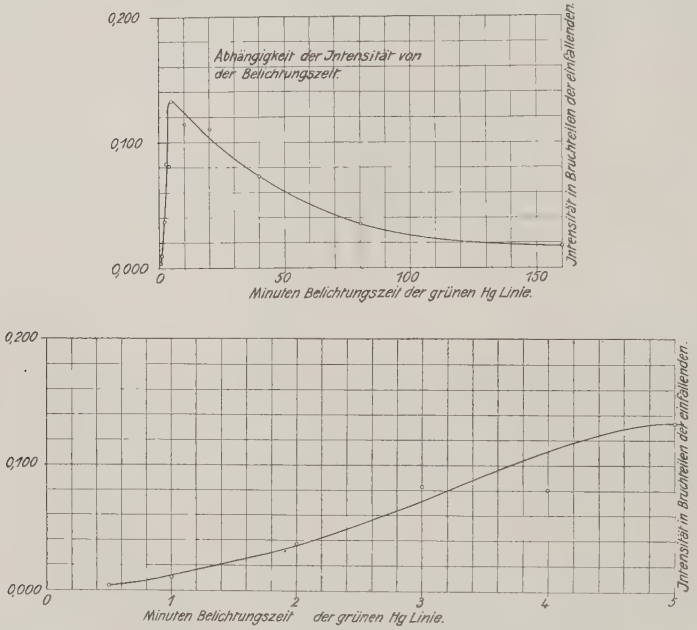
3. Intensität des Bildes einer homogenen Farbe.

Ebenso wie unter der Wellenlänge des Bildes einer homogenen Farbe die Wellenlänge größter Intensität im Spektralbilde der Aufnahme zu verstehen ist, ist unter der Intensität des Bildes einer homogenen Farbe die Intensität zu verstehen, mit der diese Wellenlänge von der Aufnahme reflektiert wird. Die Frage nach der Intensität des Bildes einer homogenen Farbe ist schon von Ives behandelt worden, der aber keine Zahlendaten angibt. Sie wurde in der vorliegenden Untersuchung auch mit der unter 1. skizzierten Anordnung geprüft, da es für die Untersuchung von Interesse war, zu wissen, unter welchen Bedingungen das beste Resultat erzielt wird.

Figur 6 zeigt die Abhängigkeit der Intensität von der Belichtungsdauer in dem Intervalle von $^1/_2$ bis 160 Minuten (Bild X der Taf. II). Um die Kurve in diesem ganzen Belichtungsgebiete zeichnen zu können, mußten zwei verschiedene Maßstäbe benutzt werden.

Das Maximum liegt hier bei 5 Minuten Belichtungsdauer. Von da ab fällt die Intensität langsam, aber beständig wieder ab. Bei ca. 30facher Überlichtung ist sie wieder auf den achten Teil ihres Maximalwertes gesunken. Im allgemeinen schwankte das Maximum zwischen 5 und 10 Minuten Belichtungsdauer.

Die folgende Tabelle VIII gibt die Intensität der Bilder der grünen Quecksilberlinie bei verschiedenen Kombinationen von Belichtungs- und Entwicklungsdauer an.



Figur 6.

Man erkennt, daß sich das Maximum mit zunehmender Entwicklungsdauer in der Richtung kürzerer Belichtungszeiten verschiebt. Bei der Entwicklungsdauer von $^1/_2$ Minute tritt innerhalb des Intervalles von 5—40 Minuten Belichtungszeit überhaupt kein Maximum mehr auf.

Tabelle VIII.

Intensität in Bruchteilen der einfallenden.

Belichtungszeit der grünen Hg-Linie	Entwicklungszeit				
	$^1/_2$ Min.	1 Min.	2 Min.	4 Min.	8 Min.
5 Min.	0	0,004	0,035	0,098	0,133
10 Min.	0,003	0,026	0,114	0,142	0,150
20 Min.	0,007	0,048	0,097	0,103	0,119
40 Min.	0,016	0,031	0,066	0,071	0,067

Die Intensität wächst bei 5, 10 und 20 Minuten Belichtungsdauer ständig bis zu 8 Minuten Entwicklungszeit. Trotzdem wurde eine Entwicklungszeit von 2 Minuten als normal gewählt, da bei

längerer Entwicklung vielfach die Homogenität des Bildes litt. Als normale Belichtungszeit wurde 10 Minuten gewählt.

Der größte Wert für die Intensität des Bildes, der bei mehreren hundert verschieden belichteten und entwickelten Aufnahmen überhaupt erzielt wurde, ist der des Hauptmaximums der Kurve 2,

$$J_1 = 0{,}259.$$

Im besten Falle reflektiert also die Aufnahme einer einzelnen Farbe ca. den vierten Teil des einfallenden Lichtss derselben Farbe. Im Durchschnitt war der reflektierte Bruchteil wesentlich kleiner, er betrug ca. $14\,^0/_0$.

Aus dem Werte $J_1 = 0{,}259$ kann mittels der Formel a) auf S. 23 bei Berücksichtigung der zugehörigen Werte von r und m der Wert von ϱ bestimmt werden. ϱ bedeutete den Bruchteil des einfallenden Lichts der vom ersten Elementarspiegel reflektiert wird. Die Rechnung ergibt angenähert

$$\varrho = 0{,}005.$$

Dieser Wert gibt eine Vorstellung von dem Reflexionsvermögen eines Elementarspiegels.

4. Aufnahme von zusammengesetztem Licht.

Theoretisch ist die Wiedergabe beliebig zusammengesetzten Lichts möglich. Dabei sind allerdings unendlich viele Elementarspiegel und unendlich geringe Lichtverluste bei den Reflexionen an den einzelnen Elementarspiegeln vorausgesetzt.

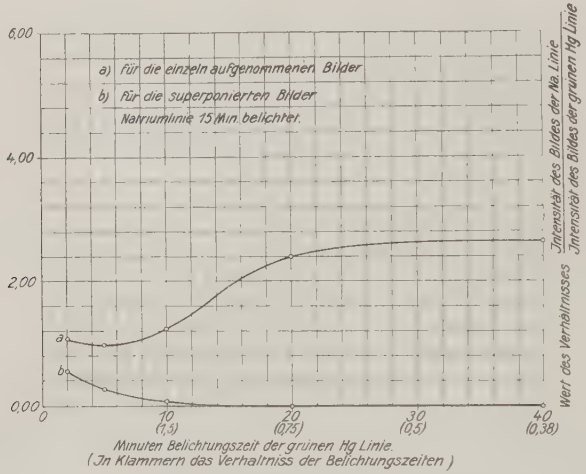
Daß die einzelnen Komponenten zusammengesetzter Farben im Bilde überhaupt wiederkehren, hat schon Lehmann[25]) gezeigt, der bis zu drei Perioden superponierte und im Bilde wieder analysierte. Ives[26]) gab mit dicken Schichten und langsamen Entwicklern bis zu vier superponierte Perioden getrennt wieder. Er erklärt mit Recht die Begrenzung der Schichtdicke als einen die Komplexität der im Bilde festzuhaltenden Farben begrenzenden Faktor. Leider erwähnt er nicht, woran bei den ihm zur Verfügung stehenden Schichtdicken die Wiedergabe noch mehr zusammengesetzter Farben scheiterte.

Sowohl Lehmann wie Ives stellten eine gegenseitige Beeinflussung der Intensität der Komponenten im Bilde fest.

Bei der folgenden genaueren Untersuchung dieses Einflusses wurden als Lichtquellen das grüne Licht des Quecksilberbogens und die Natriumflamme benutzt.

Die Intensität der Lichtquellen wurde objektiv nicht verglichen, denn die Untersuchung galt nicht der photographischen Wirkung abgemessener Lichtmengen beider Farben, die von der Farbenempfindlichkeit der photographischen Schicht abhängt, sondern lediglich dem Einfluß der Superposition.

Es wurden zu diesem Zweck mehrere aneinander grenzende Felder derselben Schicht mit zunehmender Belichtungszeit gegen die grüne Quecksilberlinie exponiert und darauf alle Felder gleichmäßig gegen die Natriumlinie, aber so, daß noch ein Teil jedes Feldes frei blieb, der nur mit der grünen Linie belichtet war.

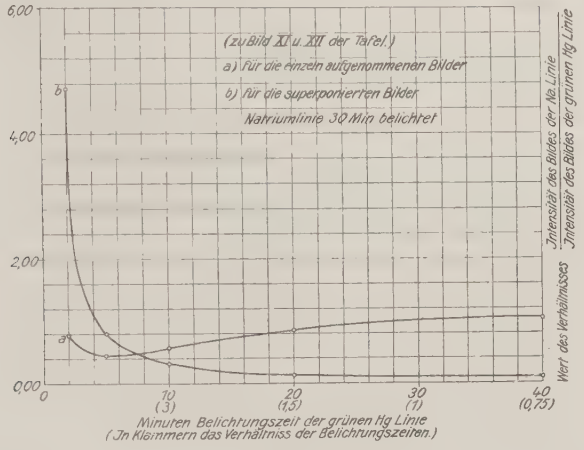


Figur 7.

Bild XI und XII der Taf. II zeigen die Spektralbilder der verschiedenen Felder dieser Aufnahme. Man sieht in Bild XI, wie die in allen Feldern gleichmäßig 30 Minuten lang belichtete Natriumlinie von der immer länger belichteten grünen Quecksilberlinie schließlich fast ganz unterdrückt wird, während der Vergleich mit Bild XII zeigt, daß in den Feldern, wo die grüne Linie nur kurze Zeit belichtet ist, diese von der hier energischer wirkenden Natriumlinie zurückgedrängt wird.

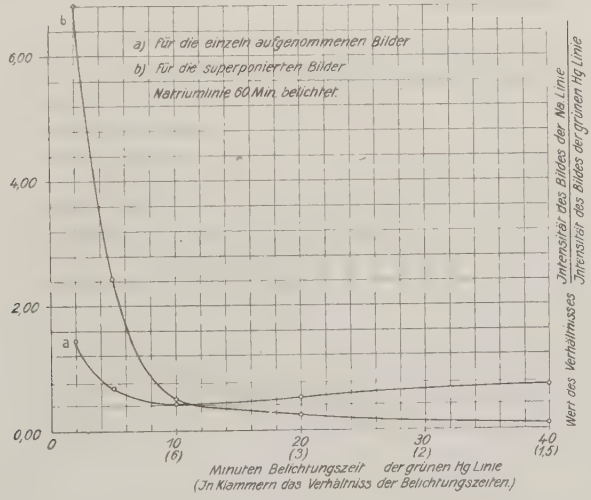
Eine bloße Verminderung der Intensität der Komponenten bei der Superposition brauchte noch nicht die Farbennuance zu ändern. Damit diese aber erhalten bleibt, muß man von einer exakten Farbenphotographie fordern, daß das Intensitätsverhältnis der Bilder der Komponenten bei der Superposition übereinstimmt mit dem Intensitätsverhältnis der Bilder der einzeln aufgenommenen Farben. Das ist hier nicht der Fall, wie man aus der Figur 8 sieht.

Kurve a) zeigt die Änderung des Intensitätsverhältnisses der Bilder der einzeln aufgenommenen Farben mit der Belichtungszeit der grünen Quecksilberlinie, Kurve b) die des Intensitätsverhältnisses



Figur 8.

der Bilder der superponierten Farben. Beide Kurven schneiden sich bei ca. 7 Minuten Belichtungsdauer der grünen Quecksilberlinie. Nur hier ist also die oben ausgesprochene Forderung erfüllt, wäh-

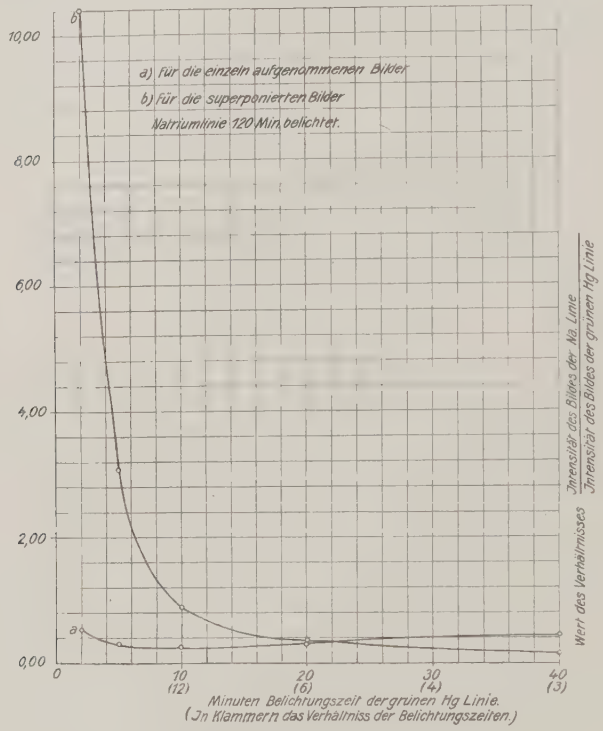


Figur 9.

rend in den Feldern kleinerer Belichtungszeiten die grüne Linie, in den Feldern größerer Belichtungszeiten die gelbe Linie zurückgedrängt ist.

Die Figuren 7, 9 und 10 zeigen die entsprechenden Kurven

bei 15, 60 und 120 Minuten Belichtungsdauer der Natriumlinie. Im ersten Falle schneiden sich die Kurven überhaupt nicht. Hier ist die Natriumlinie von Anfang an unterdrückt. Mit zunehmender Belichtungsdauer der Natriumlinie rückt der Schnittpunkt beider Kurven nach längeren Belichtungszeiten der grünen Quecksilberlinie hin, wie das nicht anders zu erwarten ist.



Figur 10.

Die Unterdrückung des Bildes einer Farbe durch das der andern ist keine einfache Funktion der Intensität der Einzelbilder. Das zeigt sich darin, daß die Überschreitung des Intensitätsmaximums in den Einzelbildern sich in dem Bilde der superponierten Farben nicht bemerkbar macht. Die gegenseitige Beeinflussung der Bilder der Komponenten hängt vielmehr lediglich ab von der Stärke der Wirkung der Komponenten auf die photographische Schicht. Das zeigt am besten die folgende Tabelle IX, die die Werte der Intensität in Bild XI und XII der Taf. II angibt. Gerade an der Stelle, wo das Bild der grünen Linie allein sein Maximum erreicht, sind bei der Superposition beide Linien ungefähr gleich hell; dagegen ist bei

der Belichtungszeit der grünen Linie von 80 Minuten, bei der die Intensität ihres Einzelbildes schon ca. dreimal so klein geworden ist, die gelbe Linie fast verschwunden, während die grüne nur wenig zurückgedrängt ist.

Tabelle IX.

Superposition der Natriumlinie und der grünen Hg-Linie.

Belichtungszeit der grünen Hg-Linie	Na-Linie 30 Min. bel.		Na-Linie 0 Min. bel.
	Intensität des Bildes der Na-L.	Intensität des Bildes d. gr. Hg-L.	Intensität des Bildes der grünen Hg-Linie in Bruchteilen der einfallenden
	in Bruchteilen der einfallenden		
0 Min.	0,066	0	0
2 Min.	0,059	0,012	0,088
5 Min.	0,026	0,032	0,149
10 Min.	0,013	0,039	0,121
20 Min.	0,004	0,040	0,078
40 Min.	0,003	0,042	0,065
80 Min.	—	0,038	0,048

Ives hat bei seiner Untersuchung über die Wiedergabe zusammengesetzter Farben sorgfältig die Überschreitung des Intensitätsmaximums im Bilde vermieden. Die vorangehenden Messungen (Figur 6) zeigen nun, daß die Intensität des Bildes mit wachsender Belichtungszeit sehr bald hinter dem Schwellenwert[27]) ein Maximum erreicht, um dann nur ganz allmählich wieder abzunehmen, daß also das Belichtungsgebiet, in dem das Intensitätsmaximum des Bildes noch nicht erreicht wird, verhältnismäßig sehr klein ist. Der Versuch, die Messung trotzdem auf dieses Belichtungsgebiet zu beschränken, scheiterte daran, daß bei diesen kurzen Belichtungszeiten und dem verhältnimäßig kleinen Spielraum für die Variation der Belichtungszeiten sich die unvermeidlichen kleinen Unterschiede in der Farbenempfindlichkeit verschiedener Stellen der Schicht störend bemerkbar machten. Dieser Umstand müßte auch in der Praxis der Mischfarbenphotographie eine Beschränkung auf das Belichtungsgebiet, in dem das Intensitätsmaximum des Bildes an keiner Stelle erreicht wird, erschweren, sofern diese Beschränkung bei den großen in der Natur auftretenden Helligkeitsunterschieden überhaupt möglich ist.

Jedenfalls wurden die vorliegenden Untersuchungen deshalb ohne Rücksicht auf die Überschreitung der Maximalintensität des Bildes ausgeführt. Selbst für den Fall, daß sich die Versuchsbedingungen deshalb mit den natürlichen Bedingungen nicht decken, bleiben die Resultate interessant.

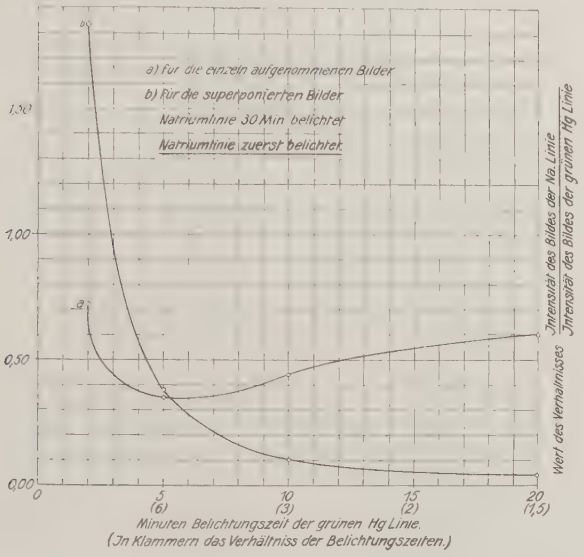
Natürlich muß schon allein die Überschreitung des Intensitätsmaximums bei der Wiedergabe von Mischfarben eine störende Wirkung ausüben. Die Unterdrückung des Bildes der schwächeren durch das der stärkeren Komponente bringt aber ein ganz unerwartetes, die Wiedergabe von Mischfarben erschwerendes Moment in die Lippmannphotographie hinein, das vielleicht die Hauptursache aller Mißerfolge bei der Aufnahme natürlicher Objekte gewesen ist.

Die Ursache dieser Erscheinung ist wohl in der Entwicklung zu suchen. Bekanntlich wird beim Entwicklungsprozeß das Bild aus dem unzersetzten Bromsilber der Schicht aufgebaut. Die durch das Licht zersetzten Bromsilbermolekeln bilden nur Keime für eine schnellere Reduktion, um die sich die entstehenden Silbermolekeln herumlagern. Es ist nun sehr wohl möglich, daß die hierbei wirksamen Kräfte bei den stärker ausgebildeten Keimen ungleich größer sind als bei den schwächeren, so daß diesen gewissermaßen das zum Aufbau des Bildes erforderliche Material entzogen wird. Bei der Photographie einer einfachen Schwingung würde dieser Umstand nicht von Bedeutung sein, da hier der Schwerpunkt der photographischen Wirkung stets in die Bauchebenen dieser einfachen Schwingung fällt. Bei der Photographie einer zusammengesetzten Schwingung dagegen muß hierdurch der Schwerpunkt der photographischen Wirkung nach den Bauchebenen der stärker belichteten Komponente hin verschoben werden.

Im praktischen Falle ist die Belichtungszeit der verschiedenen Komponenten dieselbe und nur ihre Intensität verschieden. Es liegt kein Grund vor, anzunehmen, daß die Variation der Intensität bei Konstanthaltung der Belichtungszeit zu anderen Resultaten führt, da die photochemische Wirkung im allgemeinen nur von dem Produkte Intensität × Zeit abhängt (von der Farbenempfindlichkeit der Schicht abgesehen). Deshalb wurde dieser die Messung komplizierende Fall nicht besonders untersucht. Daß kein Unterschied zwischen der Wirkung gleichzeitig und nacheinander belichteter Farben besteht, hat schon Lehmann gezeigt. Trotzdem wurde durch den folgenden Versuch noch einmal ausdrücklich festgestellt, daß kein Einfluß der Reihenfolge der Belichtung existiert.

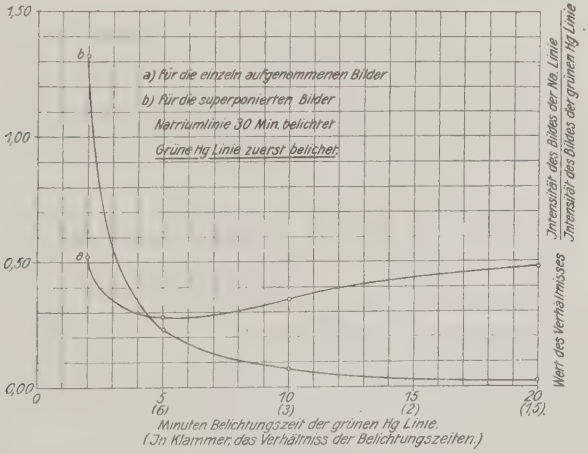
Es wurden ebenso wie bisher vier verschiedene Felder derselben Schicht mit zunehmenden Belichtungszeiten gegen die grüne Quecksilberlinie exponiert; dann wurde ein Feld, das die ersten nur zur

Hälfe überdeckte und selbst von ihnen nur zur Hälfte überdeckt wurde, gleichmäßig gegen die Natriumlinie exponiert.



Figur 11.

Darauf wurden noch einmal genau wie vorher vier Felder mit der grünen Linie belichtet. Diese überdeckten mit ihrer einen Hälfte die von den ersten freigelassene Hälfte des Feldes der Natriumlinie.



Figur 12.

In der einen Hälfte der Aufnahme ist auf diese Weise zuerst die grüne Quecksilberlinie, in der anderen Hälfte zuerst die Natriumlinie belichtet.

Das Resultat zeigen die Figuren 11 und 12. Die Kurven *b*)

weichen zwar ein wenig voneinander ab, aber diese kleine Abweichung muß als Folge einer unvermeidlichen Schwankung der Farbenempfindlichkeit an den verschiedenen Stellen der Schicht angesehen werden. Das beweisen die Kurven *a*), die sich sonst decken müßten. Von Bedeutung ist nur die Tatsache, daß der Schnittpunkt von *a*) und *b*) in beiden Fällen fast an derselben Stelle liegt, was eben die Unabhängigkeit des Resultates von der Reihenfolge der Belichtung beweist.

Aus der Tabelle IX ersieht man, wie sehr selbst in dem Felde, wo die Bilder beider Komponenten ungefähr gleich hell sind, jede einzelne von ihnen an Intensität eingebüßt hat. Dieser Verlust an Intensität wächst mit zunehmender Anzahl der Komponenten. Daran scheitert die Wiedergabe beliebig zusammengesetzten Lichtes bei exakter Farbenwiedergabe.

Es wäre denkbar, die hierdurch gegebene Grenze für die exakte Wiedergabe von zusammengesetztem Lichte durch weitere Vergrößerung der Dicke hinauszuschieben, denn mit zunehmender Anzahl der Elementarspiegel wächst theoretisch nicht nur die Homogenität, sondern auch die Intensität der Bilder der einzelnen homogenen Komponenten.

Tatsächlich wurde die Grenze hierdurch nicht weiter hinausgeschoben, da die Homogenität und die Intensität der Bilder bei Vergrößerung der Dicke über die durchschnittlich benutzte von 0,04 mm nicht weiter wuchs.

Doch gelang es mit Schichten von dieser Dicke[28]) schon, eine Mischung von vier homogenen Komponenten exakt wiederzugeben und die gelbe Quecksilberdoppellinie, deren Komponenten um ca. 2 $\mu\mu$ verschieden sind, als Doppellinie im Bilde festzuhalten. Die Natriumlinie konnte nicht mehr getrennt wiedergegeben werden. Bei der Wellenlängendifferenz von 2 $\mu\mu$ liegt also ungefähr die bisher erreichte Grenze für die getrennte Wiedergabe zweier superponierter, homogener Farben.

Für diese Grenze ist in den Fällen, wo das Spektralbild der Aufnahme einer homogenen Farbe eine ununterbrochene Spektrallinie ist, die Breite dieser Spektrallinie entscheidend, in dem unter 1. ausführlich beschriebenen Falle dagegen, wo diese Spektrallinie von dunklen Interferenzstreifen unterbrochen ist, entscheidet die Breite des Hauptmaximums. In der Kurve 2 ist die Wellenlängendifferenz zwischen den nächstliegenden Stellen minimaler Intensität auf beiden Seiten des Hauptmaximums ca. 4 $\mu\mu$. Es ist wahrscheinlich, daß schon die halbe Differenz zwischen den Wellenlängen zweier superponierter, homogener Farben ausreichen würde, um die Hauptmaxima getrennt erscheinen zu lassen.

Bild VII ist das spektral zerlegte Bild der gelben Quecksilberdoppellinie, Bild VIII das spektral zerlegte Bild von vier superponierten Farben, der Natriumlinie, der gelben Quecksilberdoppellinie und der grünen Quecksilberlinie. Die Homogenität der einzelnen Bilder ist nicht schlechter wie in den Bildern der einzelnen Farben.

Die Untersuchung der Superposition einer größeren Anzahl von Komponenten auf diesem Wege bot aus dem obengenannten Grunde Schwierigkeiten (s. S. 42 oben). Es wurde deshalb ein anderer Weg eingeschlagen.

Nimmt man auf einer Lippmannplatte ein Spektrum bei schmaler Spaltöffnung auf und bringt man die Aufnahme in das Licht einer homogenen Lichtquelle, so zeigt das Spektrum an der Stelle, wo die identische Farbe abgebildet ist, eine ziemlich schmale Linie. Es ist dies die lichtstärkste Methode für die Feststellung der Existenz eines Bildes. Denn einerseits wird bei dieser Anordnung das von der Aufnahme ausgehende Licht durch keinen Spektralapparat geschwächt, bevor es ins Auge gelangt, und andererseits ist die Intensität homogener Lichtquellen unter Umständen sehr groß wie z. B. bei der grünen Quecksilberlinie und der Natriumlinie, da sich die Emmission auf ein sehr kleines Wellenlängengebiet konzentriert.

Es wurden nun sechs solche Spektra auf einer Schicht superponiert und zwar in der Weise, daß jedes folgende Spektrum gegen das vorhergehende sowohl in der Richtung der Spektrallinien, wie senkrecht dazu verschoben war. Es enstanden auf diese Weise Felder, wo zwei, solche wo drei und schließlich solche, wo sechs Farben sich überdeckten. Bild IX ist das Bild dieser Aufnahme im Natriumlichte. Man sieht, wie mit zunehmender Anzahl der superponierten Spektrumbilder das Bild der Natriumlinie schwächer und schwächer wird. Aber selbst an der Stelle, wo sich sechs Komponenten überlagern, ist das Bild noch deutlich zu sehen, ein Beweis dafür, daß an dieser Stelle sechs Farben abgebildet sind, denn das Bild der Natriumlinie ist vor den andern nicht bevorzugt. Man könnte die Anzahl der Komponenten noch erhöhen, würde aber schließlich auch hier in der zu gering werdenden Intensität eine Grenze finden.

Die Tatsache, daß mit wachsender Anzahl der Komponenten die Intensität jeder einzelnen von ihnen ständig abnimmt, könnte an sich in der Verteilung des bei der Entwicklung in Lösung gehenden Bromsilbers auf die verschiedenen Komponenten ihre Er-

klärung finden. Die Zahlen der Tabelle IX beweisen aber, daß dies nicht allein die Ursache für die Abnahme der Intensität der Komponenten sein kann, denn die Summe der Intensitäten der superponierten Bilder ist in fast allen Fällen kleiner, als die Intensität jedes Einzelbildes.

Vielleicht trifft die von Ives für seine ausgeblichenen Aufnahmen gegebene Erklärung auch für die hier untersuchten nicht ausgeblichenen Aufnahmen bis zu einem gewissen Grade zu. Fehlt nämlich die Absorption der Bildsubstanz, wie das bei den ausgeblichenen Ivesschen Aufnahmen der Fall ist, so kommen die Reflexionen in der Schicht nur durch die Schwankungen der optischen Dichte zustande. Wird nun durch die zunehmende Anzahl der Komponenten die Anzahl der Bauchebenen so groß, daß fast an allen Stellen der Schicht die maximale Menge Silber ausgeschieden wird, so werden die Schwankungen der optischen Dichte in der Schicht sehr gering sein. Es muß also mit wachsender Anzahl der Komponenten die Gesamtintensität der reflektierten Farben kleiner werden. Was für die ausgeblichenen Aufnahmen gilt, wird in geringerem Maße auch für die hier untersuchten nicht ausgeblichenen Aufnahmen gelten, bei denen die Absorption der Bildsubstanz gering war.

Ives[29]) sucht die Schwierigkeit der Wiedergabe zusammengesetzter Farben durch die Einführung der Rastermethode zu umgehen. Es ist dies wohl mehr ein hübsches physikalisches Experiment als ein Ausweg, denn die Einführung von Interferenzfarben in die Rasterphotographie ist nicht als ein Vorteil anzusehen.

Herstellung der Schichten.

Die ersten Aufnahmen wurden auf Schichten hergestellt, die durch Baden von bromkalihaltigen Gelatineschichten in 5 %iger Silbernitratlösung erhalten wurden. Die Aufnahme, deren Intensitätsverlauf durch Kurve 2 dargestellt wird, ist auf einer solchen Schicht hergestellt. Von dieser Methode, die eine Anwendung der früher bereits bei Eiweißschichten benutzten Methode auf Gelatineschichten ist, konnte man besonders feinkörniges Bromsilber erwarten. Sie lieferte auch eine Zeitlang sehr gute Resultate, erwies sich aber als so unzuverlässig, daß sie schließlich aufgegeben und die von allen anderen Experimentatoren benutzte Emulsionsmethode angewandt wurde.

Damit die Schichten sich mit reiner Pyrogallollösung entwickeln

lassen, ist ein Überschuß von Silbernitrat erforderlich. Schichten, die aus einer Emulsion von der bisher üblichen Zusammensetzung hergestellt sind, z. B. die Lehmannschen Schichten, sind mit reiner Pyrogallollösung nicht entwickelbar.

Im folgenden ist das Verfahren der Herstellung der Schichten genau beschrieben. Es werden angesetzt:

1. 64 gr Speisegelatine in 300 ccm dest. Wasser,
2. 1,5 gr Bromkali in 50 ccm. dest. Wasser,
3. 2,7 gr Silbernitrat (kryst.) in 50 ccm dest. Wasser.

Man läßt die Gelatine einige Minuten in kaltem Wasser aufquellen und schmilzt sie dann bei 60° C. Nachdem die Gelatine geschmolzen ist, wird sie unter Druck durch Leinwand filtriert, die vorher durch Auswaschen von Stärke befreit ist. Man benutzt dazu am besten die übliche Druckfiltrierflasche und einen Porzellansiebtrichter mit ebenem Boden, an den ein kreisförmig ausgeschnittenes, mit destilliertem Wasser angefeuchtetes Leinwandstückchen angedrückt ist. Der Filtrierprozeß kann in 2—3 Minuten beendet sein.

Nun teilt man die Lösung in zwei gleiche Teile ein. Sobald sie sich auf etwa 38° C abgekühlt hat, fügt man zu der einen Hälfte die Bromkalilösung, darauf zu der andern die Silbernitratlösung hinzu. Unmittelbar darauf setzt man (bei mäßig hellem gelben Licht) die erste Hälfte langsam und unter beständigem Umrühren zu der zweiten hinzu.

Diese Operationen müssen ohne Zeitverlust unmittelbar aufeinander folgen, da sich sonst die Gelatine zu sehr abkühlt. Sie soll nach der Vereinigung beider Hälften die Temperatur von 33—35° C haben.

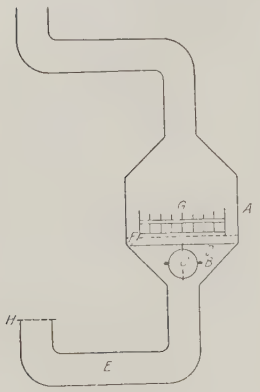
Nach der Vereinigung ist die Emulsion mittels eines vorgewärmten Scheidetrichters von Luftbläschen zu befreien.

Die Emulsion ist nunmehr fertig und kann auf Glasplatten gegossen werden. Diese sind vorher gut mit Salpetersäure zu reinigen und sorgfältig von Staubteilchen zu befreien. Der Guß erfolgt am besten aus einem Glaskolben. Beim Gießen nimmt man die etwas vorgewärmte Platte in die linke Hand, den Kolben mit der Emulsion in die rechte Hand und bewirkt durch Neigen der Glasplatte die Verteilung der aufgegossenen Emulsion. Ist mehr Emulsion auf die Glasplatte gegossen worden als darauf bleiben soll, was zum Zwecke rascher Verteilung der Emulsion über die Glasplatte meistens notwendig ist, so läßt man soviel wieder abfließen, als zur Erzielung der gewünschten Dicke notwendig erscheint. Die Dicke von 0,04 mm erwies sich als geeignetste. Bei einiger Übung weiß man bald, wie-

viel Emulsion auf der Platte bleiben darf, damit diese Dicke erzielt wird. Darauf werden die Platten auf ein Nivelliergestell gelegt bis die Emulsion erstarrt ist.

Die Schichten müssen nach dem Erstarren so schnell wie möglich getrocknet werden. Zu diesem Zwecke wurden sie in einen Trockenschrank gebracht, der folgendermaßen konstruiert war (Figur 13):

In einen senkrecht stehenden, lichtdicht abgeschlossenen Zylinder *A* aus Schwarzblech ist ein $^1/_4$ pferdiger Elektromotor *B* so eingebaut, daß seine Achse *C* mit der des Zylinders zusammenfällt. An dem oberen Ende der Motorachse ist ein Propeller *D* befestigt, der fast den ganzen Querschnitt des Zylinders ausfüllt. Der Propeller saugt von unten aus einem weiten, gebogenen, innen geschwärzten Rohre *E*, durch das kein Licht eintreten kann, Luft an und treibt sie durch ein ebensolches Rohr oben wieder hinaus. In dem Zylinder, der sich mit einer lichtdicht schließenden Tür öffnen läßt, befindet sich unmittelbar über dem Propeller ein weitmaschiges Drahtnetz *F*. Auf diesem befinden sich Plattenständer, in die die Platten *G* senkrecht eingestellt werden, so daß die Luft von dem Propeller zwischen ihnen hindurch getrieben wird. Die angesaugte Luft wird durch ein Filter *H* aus Metallgaze von Staubteilchen befreit.



Figur 13.

Mit dieser Vorrichtung konnten ca. 20 Platten gleichzeitig in ca. 4 Stunden getrocknet werden.

Ein Auswaschen der Schichten ist im allgemeinen nicht erforderlich. Von Sensibilisatoren wurden Äthylrot, Pinachrom, Pinaverdol, Pinacyanol und Erythrosin benutzt. Von diesen bewährten sich Äthylrot und Pinachrom am besten. Schließlich wurde fast ausschließlich Äthylrot in der von Miethe vorgeschriebenen Konzentration benutzt. Um der Wirkung in der ganzen Tiefe der Schicht sicher zu sein, wurde 20 Minuten gebadet und gewaschen. Nimmt die Schicht die Farbe des Äthylrots nicht merklich an, so muß sie vor dem Sensibilisieren ca. 20 Minuten ausgewaschen werden. Das Auswaschen erfolgt am besten mit destilliertem Wasser und einer Rührvorrichtung, da beim Waschen mit gewöhnlichem Wasser leicht Trübung der Schicht eintritt.

Die Schichten neigen infolge ihres Silbernitratüberschusses zur Schleierbildung, die aber erst 4 oder 5 Tage nach ihrer Herstellung in stärkerer Form auftritt. Aber auch dann noch liefern sie, im ganzen ca. 14 Tage lang, brauchbare Resultate. Auch gründlicheres Auswaschen der Schichten verlängert ihre Lebensdauer nicht wesentlich.

Zusammenstellung der Ergebnisse.

Im folgenden sind die Resultate der Untersuchung noch einmal kurz zusammengestellt.

1. Das Spektralbild der Aufnahme einer homogenen Farbe ist in vielen Fällen nicht einfach eine verbreiterte Spektrallinie, sondern es ist durchsetzt von dunklen Interferenzstreifen, die einen Schluß auf die Anzahl der Elementarspiegel und die Schwächung des einfallenden Lichts beim Durchgang durch einen einzelnen Elementarspiegel ziehen lassen.

2. Die Wellenlänge der wiedergegebenen Farbe wird am meisten durch Fixage und Luftfeuchtigkeit beeinflußt. Die Verschiebung der Wellenlänge durch die Fixage erfolgt stets in der Richtung kleinerer Wellenlängen und beträgt ca. 6—7 %. Die Verschiebung der Wellenlänge durch die Luftfeuchtigkeit erfolgt in der Richtung größerer oder kleinerer Wellenlängen, je nachdem die Luftfeuchtigkeit zu- oder abnimmt und beträgt durchschnittlich 1 % pro 10 % Luftfeuchtigkeitsänderung.

Stimmt die Luftfeuchtigkeit bei der Beobachtung mit der bei der Aufnahme überein und wird die Fixage unterlassen, so beträgt die durchschnittliche Abweichung der wiedergegebenen von der aufgenommenen Wellenlänge noch nicht 1 %.

Änderung der Belichtungszeit innerhalb weiter Grenzen und Superposition einer zweiten Periode haben keinen Einfluß auf die wiedergegebene Wellenlänge.

Bei zunehmender Entwicklungszeit macht sich ein geringes Anwachsen der wiedergegebenen Wellenlänge bemerkbar.

3. Die Intensität des Bildes einer homogenen Farbe wächst mit zunehmender Belichtungszeit, erreicht bald ein Maximum und fällt langsam aber beständig wieder ab. Die Messung ergab, daß die Intensität in einem Falle bei ca. 30facher Überlichtung auf den achten Teil ihres Maximalwertes gefallen war. Mit zunehmender Entwicklungszeit verschiebt sich das Maximum der Intensität in der Richtung kürzerer Belichtungszeiten.

Der im Maximum des Spektralbildes der Aufnahme einer homo-

genen Farbe reflektierte Bruchteil des einfallenden Lichtes betrug im besten Falle 26%. Im Durchschnitt betrug er nur ca. 14%.

4. Bei der Superposition zweier homogener Farben findet eine gegenseitige Beeinflussung der Intensität ihrer Bilder statt, und zwar in dem Sinne, daß, wenn die Wirkung einer von beiden auf die photographische Schicht zunimmt, das Bild der anderen allmählich zurückgedrängt und schließlich sogar fast ganz zum Verschwinden gebracht wird.

Das Intensitätsverhältnis der superponierten Bilder ist keine einfache Funktion des Intensitätsverhältnisses der einfachen Bilder, was sich darin zeigt, daß die Überschreitung des Intensitätsmaximums in den einfachen Bildern die Schwächung der andern Komponente nicht hintansetzt. Das Intensitätsverhältnis ist vielmehr (bei gegebener Farbenempfindlichkeit der photographischen Schicht) lediglich durch die auf die photographische Schicht einwirkenden Lichtmengen beider Farben bestimmt.

Hält man den Wert der Lichtmenge einer Farbe konstant, so ist die Bedingung der Gleichheit des Intensitätsverhältnisses der Bilder der einzeln und der übereinander aufgenommenen Farben nur für einen bestimmten Wert der Lichtmenge der anderen Farbe erfüllt. Für alle anderen Werte wird bei der Superposition diejenige Farbe zurückgedrängt, zu deren Ungunsten sich das Verhältnis der Lichtmengen verschoben hat.

Diese Erscheinung erschwert die exakte Wiedergabe von Mischfarben in der Lippmannphotographie.

Die Reihenfolge der Belichtung beider Farben hat keinen Einfluß auf diese Erscheinungen.

Die gelbe Quecksilberdoppellinie ($\lambda = 576{,}9\ \mu\mu$ und $579{,}0\ \mu\mu$) konnte auf Schichten von 0,03 und 0,04 mm Dicke als Doppellinie wiedergegeben werden. Die Natriumlinie konnte nicht mehr getrennt wiedergegeben werden. Die in der vorliegenden Untersuchung erreichte Grenze für die getrennte Wiedergabe zweier superponierter homogener Farben liegt demnach bei ca. $2\ \mu\mu$.

Die Natriumlinie, die gelbe Quecksilberdoppellinie und die grüne Quecksilberlinie wurden auf 0,03—0,04 mm dicken Schichten superponiert und als 4 scharfe Linien wiedergegeben.

Durch teilweise Superposition von 6 Spektrumbildern und Betrachtung der Aufnahme im Natriumlicht konnte die Möglichkeit der Superposition von 6 Farben nachgewiesen werden. Das Kriterium war das Auftreten einer hellen Linie im Natriumlichte auch an der Stelle, wo 6 Spektrumbilder, also 6 Farben, superponiert waren.

Anmerkungen.

1) Wiener, Ursache und Beseitigung eines Fehlers bei der Lippmannschen Farbenphotographie, zugleich ein Beitrag zu ihrer Theorie. Wied. Ann. **69.** 488. 1899.

2) Lehmann, Beiträge zur Theorie und Praxis der direkten Farbenphotographie mittels stehender Lichtwellen nach Lippmanns Methode.

3) Ives, Experimentaluntersuchung über die Lippmannsche Farbenphotographie. Zeitschr. f. wiss. Phot. **6.** 373.

4) Bei 140 Volt Elektrodenspannung.

5) Für den Lichtabschluß sorgt der Quecksilberspiegel selbst.

6) Diese Art des Ausgleiches der verschiedenen Entwicklerwirkung an der Oberfläche und in der Tiefe der Schicht versagt bei Verwendung des üblichen Zusatzes von Ammoniak zum Pyrogallol, da durch diesen Zusatz die Entwicklung zu sehr beschleunigt wird.

7) Neuhaus, Die Farbenphotographie nach Lippmanns Verfahren. S. 12.

8) O. Wiener, l. c. S. 524.

9) Um ein scharf begrenztes Bild des Spiegels *G* zu erhalten, wurde als Unterlage für die als Spiegel dienende Silberschicht eine scharfkantige Glasplatte von nur 0,65 mm Dicke verwandt, bei der die Reflexion an der Kante des Spiegels nicht mehr störend wirkte. Der Spiegel wurde von der Glasseite aus verwandt.

10) Siehe auch Ives, l. c. S. 380.

11) A. Schütt, Wied. Ann. 1896. S. 544.

12) O. Wiener, l. c. S. 521.

13) Siehe auch K. Försterling, Lichtfortpflanzung in inhomogenen Medien, Phys. Zeitschr. Nr. 7. 1913. S. 265.

14) O. Wiener, l. c. S. 518.

15) G. Meslin, Ann. de chim. et de phys. (6) **27.** 387. 1892.

16) In Figur 2 mußte wegen des geringen Abstandes der Minima voneinander der Wellenlängenmaßstab verdoppelt werden, in Figur 4 mußte mit Rücksicht auf die geringe Intensität der Aufnahme der Intensitätsmaßstab verzehnfacht werden.

17) Genauer am $m + 1^{\text{ten}}$.

18) Wiener, l. c. S. 521.

19) Dieser Wert ist mit Rücksicht auf die relativ große Abweichung von 1 ohne die in Gleichung d) vorgenommene Annäherung berechnet.

20) Die ersten Beobachtungen sind an Aufnahmen der grünen Hg-Linie allein gemacht; daher fehlen hier die Angaben für die Na-Linie.

21) Wernicke, Pogg. Ann., Ergänzungsbd., **8.** 65. 1878.

22) Wiener, Pogg. Ann. **31.** 629. 1887.

23) Das zur Erzeugung der Luftinterferenzen aufgelegte Glasprisma reichte nur gerade bis über die Schichtgrenze, wo die Dicke gemessen wurde. Der übrige Teil der Schicht blieb unbedeckt. Auf diese Weise konnte die Dicke und die Lage der Schichtinterferenzen gleichzeitig bestimmt werden.

24) Die Schicht wurde mit dem Licht der grünen Quecksilberlinie von der Schichtseite aus belichtet, um stehende Wellen zu vermeiden. Die durch die schwache Reflexion an der Grenze Glas—Schicht hervorgerufenen stehenden Wellen sind zu schwach, um eine merkliche Inhomogenität der Silberausscheidung zu verursachen.

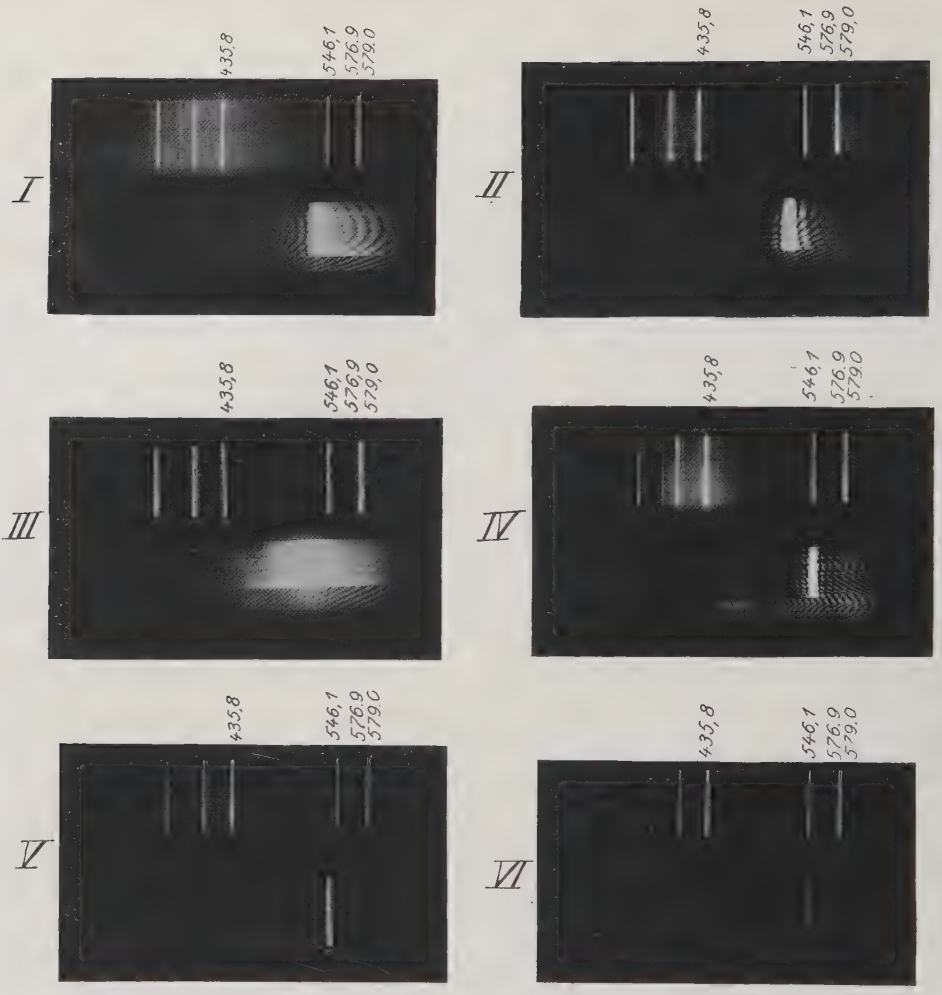
25) Lehmann, l. c. S. 9 u. folgende.

26) Ives, l. c. S. 386.

27) Der Schwellenwert lag für die grüne Hg-Linie ungefähr bei $^1/_2$ Minute Belichtungsdauer.

28) Auch schon mit 0,03 mm dicken Schichten.

29) Ives, l. c. S. 396.



Erklärungen zu Tafel I u. II.

Das obere Bild in I—VIII und in XI und XII ist das zum Vergleich aufgenommene Spektrum des Quecksilberbogens. I—VI und X—XII sind mit einem Gitterspektrographen, VII und VIII mit einem Prismenspektrographen aufgenommen.

I. Spektral zerlegtes Bild des Lichtes der grünen Quecksilberlinie (λ = 546,1 $\mu\mu$) auf einer Lehmannplatte (ausgeblichen).

II. Wie I, unausgeblichen.

III. Wie II, von der Schichtseite beobachtet.

IV. Wie I, auf einer Schicht von 0,02 mm Dicke (ausgeblichen).

V. Wie I, auf einer Schicht von 0,07 mm Dicke (ausgeblichen).

VI. Wie II, auf einer dicken Schicht.

VII. Spektral zerlegtes Bild des Lichtes der gelben Quecksilberdoppellinie (λ = 576,9 $\mu\mu$ und 579,0 $\mu\mu$).

VIII. Spektral zerlegtes Bild des Lichtes der grünen und gelben Quecksilberlinie und der Natriumlinie (λ = 546,1 $\mu\mu$, 576,9 $\mu\mu$, 579,0 $\mu\mu$ und 589,3 $\mu\mu$).

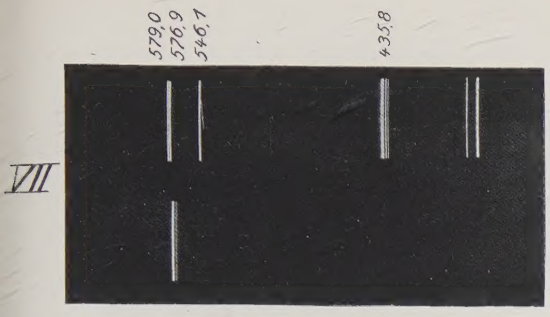
IX. Bild von sechs teilweise superponierten Spektren im Natriumlichte.

X. Wie II, auf einer dicken Schicht bei verschiedenen Belichtungszeiten: $^1/_2$, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 40, 80 u. 160 Min.

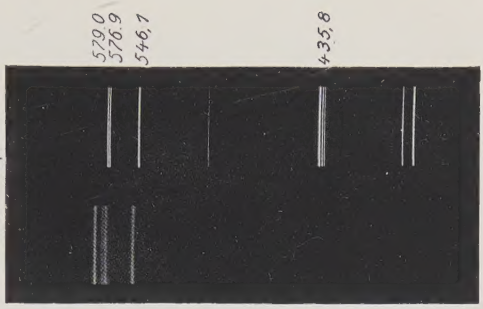
XI. Spektral zerlegte Bilder des Lichtes der Natriumlinie und der grünen Quecksilberlinie (λ = 589,3 $\mu\mu$ und 546,1 $\mu\mu$) superponiert bei konstanter Belichtungszeit der Natriumlinie von 30 Min. und Belichtungszeiten der grünen Linie von 0, 2, 5, 10, 20, 40 und 80 Min.

XII. Spektral zerlegte Bilder des auf derselben Schicht wie XI mit 0, 2, 5, 10, 20, 40 und 80 Min. Belichtungszeit allein aufgenommenen Lichtes der grünen Quecksilberlinie (λ = 546,1 $\mu\mu$).

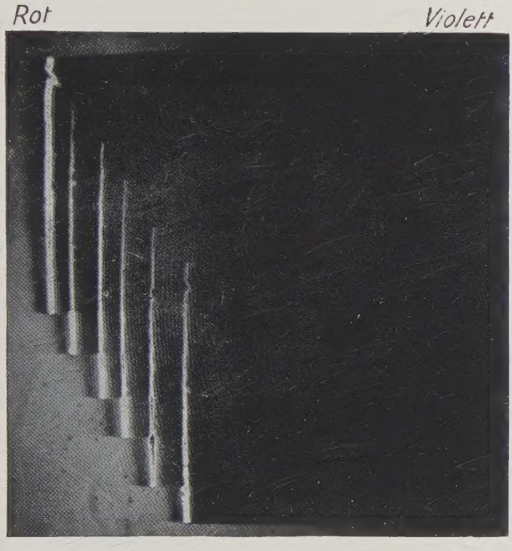
R. Aron.



VII

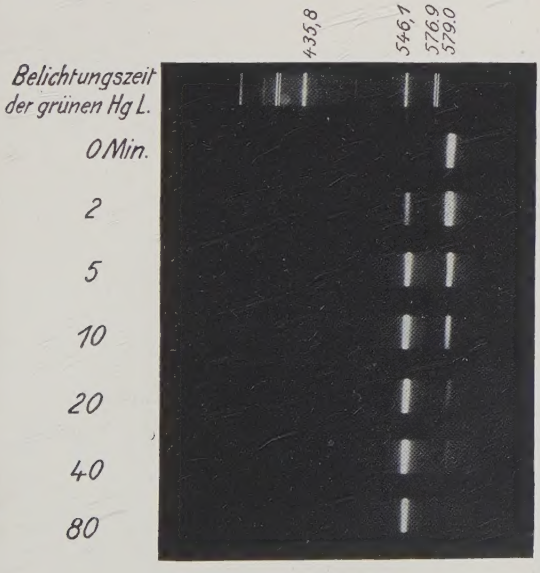


VIII

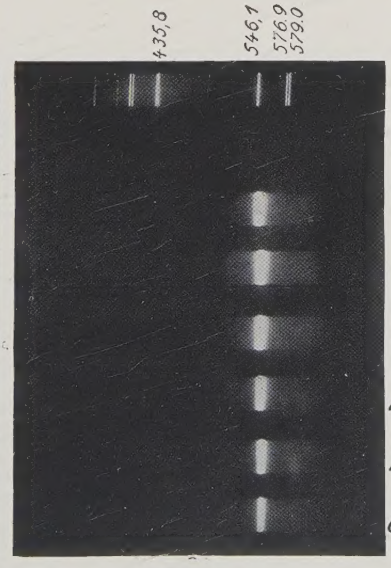


IX

X



XI



XII

R. Aron.

Lebenslauf.

Geboren bin ich, Reinhod Aron, israelitischer Konfession, am 18. August 1885 in Berlin als Sohn des Dr. phil. Hermann Aron. Die Schule besuchte ich in Berlin und erlangte das Reifezeugnis an dem Sophien-Realgymnasium zu Berlin im September 1904. Ich studierte Physik an den Universitäten Berlin, Heidelberg und Leipzig und besuchte die Vorlesungen und Übungen folgender Dozenten:

In Berlin: Drude, Fischer, Schwarz, Landolt.

In Heidelberg: Quincke, Koenigsberger.

In Leipzig: Wiener, Des Coudres, Hantzsch, Rohn, Hölder, Scholl, Marx, Schaum, Mayer, Hausdorff, Neumann.